

ALMIR BARROS DA SILVA SANTOS NETO

CISALHAMENTO EM CORPOS-DE-PROVA DE MADEIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Florianópolis
1999**

ALMIR BARROS DA SILVA SANTOS NETO

CISALHAMENTO EM CORPOS-DE-PROVA DE MADEIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

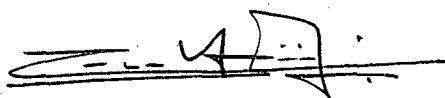
**Área de Concentração: Engenharia de Estruturas
Orientador: Prof. Carlos Alberto Szücs, Dr.
Co-orientador: Prof. Henriette Lebre La Rovere, Ph.D.**

**Florianópolis
1999**

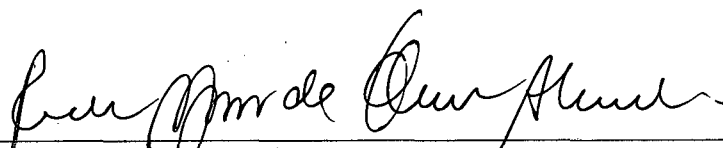
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 12/07/1999 pela comissão examinadora



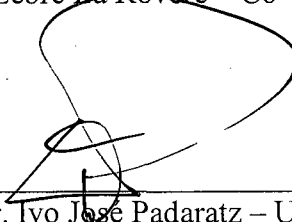
Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs – Orientador – Moderador



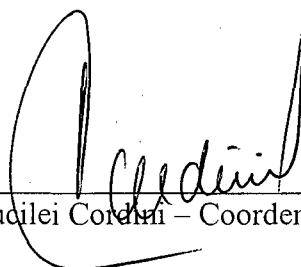
Prof. Dr. Pedro Afonso de Oliveira Almeida – EPUSP/USP



Prof. Ph.D. Henriette Lebre La Rovere – Co-Orientador – UFSC



Prof. Dr. Ivo José Padaratz – UFSC



Prof. Dr. Judilei Cordani – Coordenador do CPGEC

**Aos meus Pais Gilvan e Márcia, pelo amor,
incentivo e amizade sempre demonstrados
durante estes anos.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Carlos Alberto Szücs pela orientação durante a realização dos trabalhos desenvolvidos.

Às Professoras Henriette Lebre La Rovere pela co-orientação e Ângela do Valle pela colaboração e ensinamentos recebidos durante o decorrer do curso.

Ao Prof. Adolar Bohn pela troca de idéias e conversas sempre alegres.

Ao Prof. Carlito Calil Júnior pela confiança e cooperação em ceder os recursos laboratoriais disponíveis no LaMEM/USP.

À Irizete Meneses da Coordenadoria da Pós-graduação

À empresa Klabin Fabricadora de Papel e Celulose S.A. pelo fornecimento de madeira.

Aos amigos Gihad Mohamad, André Matte Sagave, Ives Fátima Fedatto, Eduardo Rizzatti, Rodolfo, Geralcy Carneiro, Ana Azambuja Carneiro, Silvana Lapert, Sandra Zampieri, Rita de Cássia Gazem, Paulo Cesar Ferrolli, Lisiane Librellotto, Flávio Santos.

Aos Colegas Robsom Hoffmann da Silva e Gustavo Dias Lacerda pelo apoio e ajuda na realização dos ensaios.

À meus irmãos Luciana, Gustavo e Guilherme.

À Andréia da Silva Medeiros pelo carinho, apoio e paciência demonstrada ao longo deste trabalho.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, cuja bolsa de estudos viabilizou a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	v
Lista de Abreviaturas e Siglas	vii
Lista de Símbolos	viii
Resumo	ix
Abstract	x

1- INTRODUÇÃO

1.1- Generalidades	1
1.2- Objetivo Geral	3
1.3- Objetivos Específicos	3
1.4- Estrutura do Trabalho	4

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Introdução	6
2.1.1- Conceitos preliminares	6
2.1.2- Resumo das principais literaturas consultadas	8
2.2- Características Anatômicas da Madeira	10
2.2.1- Classificação das madeiras	10
2.2.2- Estrutura macroscópica do tronco	11
2.2.3- Estrutura microscópica da madeira	12
2.2.3.1- Estrutura microscópica das Coníferas	13
2.2.3.2- Estrutura microscópica das Dicotiledôneas	14
2.2.4- Comportamento mecânico da madeira no nível das direções principais	15
2.2.5- Considerações sobre a ortotropia da madeira	17
2.3- Normas para Ensaio de Cisalhamento	19
2.3.1- Norma Brasileira	19
2.3.2- Norma Portuguesa	20
2.3.3- Norma Americana	23
2.3.4- Norma ISO	24
2.3.5- Norma Pan-americana	25
2.3.6- Norma Francesa	26
2.4- Estudos entre Métodos de Ensaio para Cisalhamento na Madeira	27
2.4.1- Estudo de BROTERO (1935)	27
2.4.2- Estudo de VIEIRA (1940)	28
2.4.3- Estudo de RADCLIFFE e SUDDARTH (1955)	30
2.4.4- Estudo de NORRIS (1957)	33
2.4.5- Estudo de BENDTSEN e PORTER (1978)	35
2.4.6- Estudo de MENDES (1984)	36
2.4.7- Estudo de FERREIRA (1994)	43
2.4.8- Estudo de LANG (1997)	46
2.4.9- Estudo de HECK et al. (1998)	47
2.4.10- Estudo de MOREIRA e FASSONI (1998)	48

3- CORPO-DE-PROVA ESTUDADO

3.1- Introdução	52
3.2- Justificativa	52
3.3- Modelo de Ensaio Estudado	53
3.3.1- Geometria do corpo-de-prova	54
3.3.2- Procedimento do ensaio	56

4- ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1- Introdução	58
4.2- Seleção das Amostras	58
4.3- Aquisição da Madeira	59
4.4- Corpos-de-prova Necessários	60
4.5- Determinação do Teor de Umidade da Madeira	61
4.5.1- Por meio da utilização do Sylvatest	61
4.5.2- Por meio da Norma Brasileira NBR 7190/97	63
4.5.3- Análise comparativa entre os valores de umidade	64
4.6- Controle do Teor de Umidade Por Meio da Secagem em Estufa	68
4.7- Ensaio de Compressão Paralela às Fibras da Madeira	71
4.8- Ensaio de Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira	71
4.8.1- Corpo-de-prova estudado	73
4.8.2- Corpo-de-prova estudado modificado	76
4.8.3- Corpo-de-prova da Norma Brasileira NBR 7190/97	78
4.9- Análise Comparativa entre os Planos de Cisalhamento Longitudinal-tangencial e Longitudinal-radial	81
4.9.1- Análise para os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i>	81
4.9.1.1- Corpo-de-prova estudado	81
4.9.1.2- Corpo-de-prova estudado modificado	82
4.9.1.3- Corpo-de-prova da Norma Brasileira NBR 7190/97	83
4.9.2- Análise para os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i>	84
4.9.2.1- Corpo-de-prova estudado	84
4.9.2.2- Corpo-de-prova estudado modificado	85
4.9.2.3- Corpo-de-prova da Norma Brasileira NBR 7190/97	86
4.10- Comparação Múltipla entre as Médias de Resistências ao Cisalhamento no Mesmo Plano	88
4.10.1- Análise para os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i>	88
4.10.2- Análise para os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i>	89
4.11- Método de Duncan entre os Ensaio	91
4.11.1- Análise entre os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i>	91
4.11.1.1- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano longitudinal-tangencial	91
4.11.1.2- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano longitudinal-radial	94
4.11.2- Análise entre os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i>	95
4.11.2.1- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano	95

longitudinal-tangencial	
4.11.2.2- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano longitudinal-radial	95
4.12- Conclusões da Análise Experimental	97

5- ANÁLISE NUMÉRICA

5.1- Introdução	99
5.2- Formulação do Método dos Elementos Finitos	99
5.2.1- Elementos Planos Retangulares	99
5.2.2- Elementos Sólidos	108
5.2.3- Modos Incompatíveis de Wilson	111
5.3- Equações Constitutivas para a Madeira	113
5.4- Modelagem dos Corpos-de-prova	116
5.4.1- Corpo-de-prova da Norma Brasileira	117
5.4.1.1- Apresentação do modelo e análise numérica	117
5.4.1.2- Análise dos resultados e conclusões	118
5.4.2- Corpo-de-prova estudado	123
5.4.2.1- Apresentação do modelo e análise numérica	123
5.4.2.2- Análise dos resultados e conclusões	124
5.4.3- Corpo-de-prova estudado modificado	127
5.4.3.1- Apresentação do modelo e análise numérica	127
5.4.3.2- Análise dos resultados e conclusões	129

6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1- Principais Conclusões Obtidas do Estudo de Cisalhamento	132
6.2- Recomendações para Trabalhos Futuros	133

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

135

ANEXOS

ANEXO A – Teores de umidade obtidos pelo Sylvatest e NBR 7190/97	141
ANEXO B – Resistências ao cisalhamento e densidade aparente dos corpos-de-prova ensaiados	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Aparato para ensaio de flexão utilizado por Buffon. Fonte: PLUVINAGE (1992)	1
Figura 1.2	Esforços internos em função da presença do momento fletor. Fonte MENDES (1984)	2
Figura 2.1	Planos principais de observação de um caule. Plano transversal (P_1), plano longitudinal-tangencial (P_2) e plano longitudinal-radial (P_3). Fonte: WHITE (1980)	7
Figura 2.2	Corte transversal de um tronco de árvore típico. Fonte: WHITE (1980)	12
Figura 2.3	Elementos constituintes das coníferas: (a) traqueídes na madeira de primavera e verão; (b) traqueídes na madeira de outono e inverno; (c) canal resinífero; (d) raio medular; (e) raio medular com canal resinífero; (f) pontuações. Fonte: GUITARD (1987)	13
Figura 2.4	Elementos constituintes das dicotiledôneas: (a) fibras; (b) vasos; (c) raios medulares; (d) pontuações. Fonte: GUITARD (1987)	14
Figura 2.5	Disposição dos elementos anatômicos da madeira. Fonte: SZÜCS (1991)	15
Figura 2.6	Disposição das fibras da madeira no plano longitudinal-tangencial. Fonte: SZÜCS (1991)	16
Figura 2.7	Disposição das fibras da madeira no plano longitudinal-radial. Fonte: SZÜCS (1991)	17
Figura 2.8	Eixos de simetria elástica em uma peça de madeira. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	18
Figura 2.9	Dispositivo para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: NBR-7190/97	19
Figura 2.10	Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: NBR-7190/97	20
Figura 2.11	Dispositivo para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: NP-623/73	21
Figura 2.12	Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte NP-623/73	22
Figura 2.13	Detalhe do dispositivo para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: KOLLMANN e CÔTÉ (1984)	23
Figura 2.14	Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: ASTM D 143/83	24
Figura 2.15	Dispositivo para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: PLUVINAGE (1992)	26
Figura 2.16	Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: B 51-012/42	26
Figura 2.17	Corpo de Prova adotado pelo IPT	27
Figura 2.18	(a) Dispositivo de ensaio e (b) corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira	29
Figura 2.19	Corpo de prova padrão modificado	30
Figura 2.20	Corpo de prova da viga dentada; ($L \approx 35,60$ cm, $S \approx 30,50$ cm, $b \approx 5,10$ cm, $b' \approx 1,30$ cm e $t \approx 0,40$ cm)	31
Figura 2.21	Esquema do ensaio da viga dentada	31

Figura 2.22	Distribuição das tensões de cisalhamento no corpo de prova padrão da ASTM e ASTM modificado; (1 psi \approx 0,006895 MPa)	32
Figura 2.23	(a) Corpo de prova e (b) dispositivo para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: PLUVINAGE (1992)	34
Figura 2.24	Geometria dos corpos de prova e orientação dos planos de cisalhamento. (1" \approx 25,4mm)	35
Figura 2.25	Corpo de prova e detalhe do dispositivo de ensaio adotado pelo Método Brasileiro MB-26/40	37
Figura 2.26	Esquema de ensaio para cisalhamento em dois planos	37
Figura 2.27	Esquema de ensaio para cisalhamento em dois planos realizado no LaMEM/USP	38
Figura 2.28	Esquema de ensaio para cisalhamento em um plano	38
Figura 2.29	(a) ruptura por tração normal às fibras da madeira; (b) ruptura por cisalhamento associada à tração normal às fibras da madeira	40
Figura 2.30	Disposição dos planos de cisalhamento nos corpos de prova	41
Figura 2.31	Dispositivo proposto por MENDES (1984) para o ensaio de cisalhamento	42
Figura 2.32	Modo de ruptura dos corpos de prova (a) ruptura por cisalhamento; (b) ruptura na região do apoio e (c) ruptura ao longo da seção da seção de cisalhamento mas, com a abertura da fissura propagando-se de cima para baixo	43
Figura 2.33	(a) corpo de prova proposto por FERREIRA (1994) para ensaio; (b) arranjo do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira	44
Figura 2.34	Modo de ruptura dos corpos de prova propostos, FERREIRA (1994)	44
Figura 2.35	Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira com quatro fendas	45
Figura 2.36	Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira proposto por Lang	46
Figura 2.37	Esquema para o ensaio de torção. Fonte: RIYANTO e GUPTA (1998)	47
Figura 2.38	Malha de elementos finitos para análise numérica. Fonte: MOREIRA e FASSONI (1998)	49
Figura 2.39	Corpos de prova para ensaio de cisalhamento por compressão: (a) desenvolvido por GABER (1929); (b) desenvolvido por LANG	50
Figura 2.40	Corpos de prova para ensaio de cisalhamento por tração: (a) primeira proposta de PETERMANN (1941); (b) segunda proposta de Petermann	50
Figura 2.41	Ensaio do cubo único. Dimensões do corpo de prova 50 x 50 x 50mm	51
Figura 3.1	Corpo de prova estudado, utilizado no LEE/UFSC para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira	55
Figura 3.2	Corpo de prova estudado modificado para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira	55
Figura 3.3	Tensões de cisalhamento na seção crítica do corpo de prova.	56
Figura 3.4	Medidas tomadas no corpo de prova estudado para o cálculo da resistência ao cisalhamento	57
Figura 4.1	Posição de retirada das barras na tora de madeira e posição dos anéis de crescimento	59

Figura 4.2	Equipamento Sylvatest de ultra-som	62
Figura 4.3	Utilização do Sylvatest para a determinação do teor de umidade em uma barra de <i>Eucalyptus grandis</i>	63
Figura 4.4	Sistema de nomenclatura dos corpos de prova	72
Figura 4.5	Dispositivo para ensaio de cisalhamento adotado no LEE/UFSC	74
Figura 4.6	Ruptura típica para o corpo de prova estudado da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> nos planos LT e LR	75
Figura 4.7	Ruptura típica para o corpo de prova estudado da madeira de <i>Pinus elliottii</i> nos planos LT e LR	76
Figura 4.8	Ruptura típica para o corpo de prova estudado modificado da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> nos planos LT e LR	77
Figura 4.9	Ruptura típica para o corpo de prova estudado modificado da madeira de <i>Pinus elliottii</i> nos planos LT e LR	78
Figura 4.10	(a) Instalação do corpo de prova; (b) Máquina universal de ensaios	79
Figura 4.11	Ruptura típica para o corpo de prova da NBR 7190/97 da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> nos plano LT e LR	80
Figura 4.12	Ruptura típica para o corpo de prova da NBR 7190/97 da madeira de <i>Pinus elliottii</i> nos plano LT e LR	80
Figura 4.13	Esquema das comparações das médias de resistência ao cisalhamento para os corpos de prova de <i>Eucalyptus grandis</i> no plano LT	93
Figura 5.1	(a) Elemento plano bilinear no sistema x,y ; (b) Elemento plano bilinear no sistema de coordenadas naturais ξ, η . Fonte: COOK et al. (1989)	101
Figura 5.2	(a) Elemento plano quadrático de 8, 9 nós de lados retos; (b) Elemento plano quadrático de 8,9 nós de lados curvos. Fonte: COOK et al. (1989)	101
Figura 5.3	Elemento sólido de 8 nós, também chamado de elemento trilinear. Fonte: COOK et al. (1989)	110
Figura 5.4	Elementos planos incompatíveis adjacentes. Fonte: COOK et al. (1989)	112
Figura 5.5	Componentes de tensão de um sistema em coordenadas retangulares. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	113
Figura 5.6	Eixos ortotrópicos para um bloco de madeira maciça isenta de defeitos. Fonte: BODIG e JAYNE (1982)	116
Figura 5.7	Disposição da malha de elementos do corpo de prova da Norma Brasileira	118
Figura 5.8	Distribuição de tensões τ_{xz} no corpo de prova da NBR 7190/97 (kN/cm^2)	119
Figura 5.9	Diagrama de tensões τ_{xz} ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova da NBR 7190/97 (MPa)	119
Figura 5.10	Distribuição de tensões σ_z no corpo de prova da NBR 7190/97 (kN/cm^2)	120
Figura 5.11	Diagrama de tensões σ_z ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova da NBR 7190/97 (MPa)	120
Figura 5.12	Distribuição de tensões σ_x no corpo de prova da NBR 7190/97 (kN/cm^2)	121
Figura 5.13	Diagrama de tensões σ_x ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova da NBR 7190/97 (MPa)	121

Figura 5.14	Distribuição de tensões σ_y no corpo de prova da NBR 7190/97 (kN/cm ²)	122
Figura 5.15	Diagrama de tensões σ_y ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova da NBR 7190/97 (MPa)	122
Figura 5.16	Disposição da malha de elementos do corpo de prova estudado	124
Figura 5.17	Distribuição de tensões τ_{xz} no corpo de prova estudado (kN/cm ²)	125
Figura 5.18	Diagrama de tensões τ_{xz} ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova estudado (MPa)	125
Figura 5.19	Distribuição de tensões σ_z no corpo de prova estudado (kN/cm ²)	126
Figura 5.20	Diagrama de tensões σ_z ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova estudado (MPa)	126
Figura 5.21	Disposição da malha de elementos do corpo de prova estudado modificado	128
Figura 5.22	Distribuição de tensões τ_{xy} no corpo de prova estudado modificado (kN/mm ²)	129
Figura 5.23	Diagrama de tensões τ_{xy} ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova estudado modificado (MPa)	129
Figura 5.24	Distribuição de tensões σ_y no corpo de prova estudado modificado (kN/mm ²)	130
Figura 5.25	Diagrama de tensões σ_y ao longo do comprimento da seção crítica no corpo de prova estudado modificado (MPa)	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Valores dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeiras obtidos por VIEIRA (1940)	29
Tabela 2.2	Comparação da resistência ao cisalhamento entre os diferentes corpos-de-prova, RADCLIFFE e SUDDARTH (1955)	32
Tabela 2.3	Resistências ao cisalhamento entre o corpo-de-prova painel e o corpo-de-prova da Norma Americana, NORRIS (1957)	34
Tabela 2.4	Resumo dos valores de resistência ao cisalhamento, BENDTSEN e PORTER (1978)	36
Tabela 2.5	Resistências ao cisalhamento, para madeira seca ao ar de Pinho do Paraná	37
Tabela 2.6	Resistências ao cisalhamento para o Pinho do Paraná, para cada modelo de ensaio	39
Tabela 2.7	Média das resistências ao cisalhamento encontradas para as espécies de madeira nos dois planos de cisalhamento	41
Tabela 2.8	Resistências ao cisalhamento, corrigidas para umidade de 12%, obtidas do ensaio proposto e MB-26/40	42
Tabela 4.1	Quantidade de corpos-de-prova e ensaios a serem realizados	60
Tabela 4.2	Resumo da análise estatística básica dos teores de umidade para as madeiras de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus elliottii</i> para os dois ensaios	64
Tabela 4.3	Teste F: duas amostras para variâncias; para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	66
Tabela 4.4	Teste F: duas amostras para variâncias; para a madeira de <i>Pinus elliottii</i>	67
Tabela 4.5	Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	67
Tabela 4.6	Teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes; para a madeira de <i>Pinus elliottii</i>	68
Tabela 4.7	Classe de resistência das madeiras selecionadas na condição padrão de referência U=12%	71
Tabela 4.8	Resumo estatístico das resistências ao cisalhamento para o corpo-de-prova estudado	75
Tabela 4.9	Resumo estatístico das resistências ao cisalhamento para o corpo-de-prova estudado modificado	77
Tabela 4.10	Resumo estatístico das resistências ao cisalhamento para o corpo-de-prova da NBR 7190/97	79
Tabela 4.11	Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado de <i>Eucalyptus grandis</i>	81
Tabela 4.12	Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova estudado de <i>Eucalyptus grandis</i>	82
Tabela 4.13	Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado modificado de <i>Eucalyptus grandis</i>	82
Tabela 4.14	Teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes; para o corpo-de-prova estudado modificado de <i>Eucalyptus grandis</i>	83
Tabela 4.15	Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de <i>Eucalyptus grandis</i>	83

Tabela 4.16	Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de <i>Eucalyptus grandis</i>	84
Tabela 4.17	Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado de <i>Pinus elliottii</i>	85
Tabela 4.18	Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova estudado de <i>Pinus elliottii</i>	85
Tabela 4.19	Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado modificado de <i>Pinus elliottii</i>	86
Tabela 4.20	Teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes; para o corpo-de-prova estudado modificado de <i>Pinus elliottii</i>	86
Tabela 4.21	Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de <i>Pinus elliottii</i>	87
Tabela 4.22	Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de <i>Pinus elliottii</i>	87
Tabela 4.23	Resumo estatístico para os três corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i> no plano LT	88
Tabela 4.24	Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i> no plano LT	88
Tabela 4.25	Resumo estatístico para os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i> no plano LR	89
Tabela 4.26	Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i> no plano LR	89
Tabela 4.27	Resumo estatístico para os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i> no plano LT	90
Tabela 4.28	Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i> no plano LT	90
Tabela 4.29	Resumo estatístico para os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i> no plano LR	90
Tabela 4.30	Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i> no plano LR	90
Tabela 4.31	Resultado do método de Duncan para os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i> no plano LT	93
Tabela 4.32	Resultado do método de Duncan para os corpos-de-prova de <i>Eucalyptus grandis</i> no plano LR	94
Tabela 4.33	Resultado do método de Duncan para os corpos-de-prova de <i>Pinus elliottii</i> no plano LT	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Tabela de Análise de Variância
ASTM	American Society of Testing Materials
COPANT	Comissão Panamericana de Normas Técnicas
DIN	Norma Alemã
E/LT	Corpo-de-prova estudado com o plano da seção crítica LT
E/LR	Corpo-de-prova estudado com o plano da seção crítica LR
EM/LT	Corpo-de-prova estudado melhorado com o plano da seção crítica LT
EM/LR	Corpo-de-prova estudado melhorado com o plano da seção crítica LR
EPT	Estado Plano de Tensões
GDL	Graus de Liberdade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	International Organization for Standardization
L	Direção Longitudinal às Fibras da Madeira
LAE	Laboratório de Análise em Estruturas
LaMEM	Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras
LEE	Laboratório de Experimentação em Estruturas
LR	Plano Longitudinal-radial
LT	Plano Longitudinal-tangencial
MB	Método Brasileiro
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLC	Madeira Laminada Colada
MQR	Média dos Quadrados dos Resíduos
N/LT	Corpo-de-prova da NBR 7190/97 com o plano da seção crítica LT
N/LR	Corpo-de-prova da NBR 7190/97 com o plano da seção crítica LR
NF	Norma Francesa
NP	Norma Portuguesa
R	Direção Radial (Paralela aos Raios Medulares)
SAP 2000	Structural Analysis Program
T	Direção Tangencial (Paralela aos Anéis de Crescimento)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_{\text{tração}}$	Tensões normais de tração
$\sigma_{\text{compressão}}$	Tensões normais de compressão
$\tau_{\text{rupt.}}$	Tensão de ruptura no cisalhamento
τ_{12}	Resistência ao cisalhamento no teor de umidade de 12%
$\tau_{U\%}$	Resistência ao cisalhamento no teor de umidade U%
$U\%$	Teor de umidade da madeira
ρ	Densidade da madeira
e	Espessura do corpo-de-prova estudado
A	Comprimento “A” da seção crítica de cisalhamento
B	Comprimento “B” da seção crítica de cisalhamento
$U\%_{\text{Sylvatest}}$	Teor de umidade medido pelo Sylvatest
$U\%_{\text{NBR}}$	Teor de umidade obtido pelo ensaio da NBR 7190/97
F	Distribuição F
$F_{\text{crítico}}$	Valor comparativo tabelado da distribuição F
$\sigma_{\text{Sylvatest}}$	Desvio padrão referente a umidade medida pelo Sylvatest
σ_{NBR}	Desvio padrão referente a umidade obtida pela NBR 7190/97
$t_{\text{crítico}}$	Valor comparativo tabelado da distribuição t
f_{12}	Resistência corrigida a umidade padrão de 12%
$f_{U\%}$	Resistência a umidade U%
τ_{LT}	Resistência ao cisalhamento no plano longitudinal-tangencial
τ_{LR}	Resistência ao cisalhamento no plano longitudinal-radial
$C.P.$	Corpo-de-prova
$f_{c0,m}$	Resistência média à compressão paralela às fibras
$f_{c0,k}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras

RESUMO

A resistência ao cisalhamento é uma propriedade de grande importância nos projetos de estruturas em madeira. Esta propriedade é normalmente obtida através do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras em pequenos corpos-de-prova.

No procedimento de ensaio adotado pela Norma Brasileira NBR 7190/97 e algumas normas internacionais, um carregamento de compressão é aplicado no corpo-de-prova em presença de excentricidade, originando uma combinação de tensões de cisalhamento e flexão.

Neste trabalho é apresentada uma alternativa de corpo-de-prova que evita estes esforços adicionais de flexão. Foram confeccionados um total de 144 corpos-de-prova de cisalhamento do modelo proposto e normalizado, com madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. As rupturas no modelo proposto mostraram-se bem definidas, paralelas à seção crítica, típica de ruptura por cisalhamento. A resistência ao cisalhamento nos planos longitudinal-tangencial e longitudinal-radial também foram analisadas.

Paralelamente ao ensaio experimental, realizou-se uma análise numérica que permitiu uma visualização da distribuição das tensões presentes nos corpos-de-prova da Norma Brasileira e no corpo-de-prova proposto. Por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) os corpos-de-prova foram modelados em elementos sólidos de 8 nós, com modos incompatíveis e elementos planos de 9 nós, utilizando-se nas análises o programa SAP 2000. A comparação da distribuição de tensões nos diferentes corpos-de-prova confirmou que o corpo-de-prova proposto é mais adequado para os ensaios de cisalhamento.

ABSTRACT

Shear strength is one of the main parameters for the design of timber structures. This property is usually obtained by shear parallel to grain tests on wood specimens. In the shear test procedures prescribed by the Brazilian code (NBR 7190/1997) and other international codes, an eccentric compressive loading is applied to the wood specimen, giving rise to combined bending and shear loading.

In this work, an alternative specimen for shear tests that avoids additional efforts other than shear is analyzed. A total of 144 shear tests were performed on *Eucalyptus grandis* and *Pinus elliottii* specimens, which displayed a well defined and parallel to the load failure surface, typical of shear failure. Radial and tangential shear to the annual rings were also been evaluated using the specimens.

A numerical analysis was also performed in order to visualize the stress contours on the proposed specimen and on the specimen adopted by the Brazilian code. The specimens were modeled by 8-node solid finite elements with incompatible modes and by 9-node plane elements. The analyses were run on a microcomputer utilizing the SAP 2000 program. A comparison of the stress distribution for the different specimens confirmed that the geometry of the proposed specimen is more adequate for shear tests.

1- INTRODUÇÃO

1.1- Generalidades

O primeiro relato científico a respeito da determinação do comportamento mecânico da madeira foi realizado na Inglaterra por Robert Hooke em 1663, e alguns anos depois na França por Buffon, PLUVINAGE (1992). No contexto histórico da Europa do século XVIII alguns problemas como o aumento do consumo de madeira, gerado pelo desenvolvimento acelerado das cidades e a destruição das frotas navais, incitaram os governantes de potências marítimas como França, Inglaterra e Holanda a encorajar as pesquisas em madeira. Hooke começou suas pesquisas rompendo barras de carvalho e outras madeiras. As experiências de Buffon, por exemplo, permitiram-lhe estabelecer as primeiras tabelas para o dimensionamento de vigas de madeira.

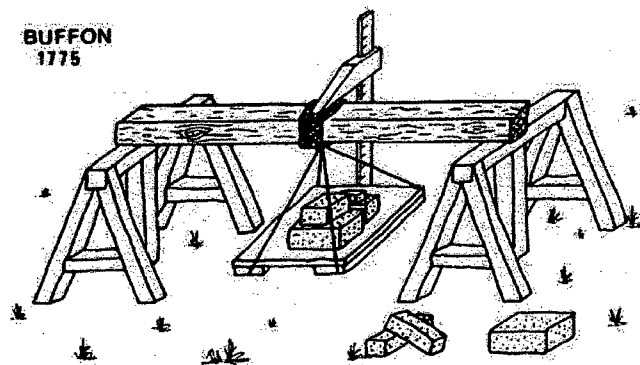


FIGURA 1.1 – Aparato para ensaio de flexão utilizado por Buffon. Fonte: PLUVINAGE (1992).

De uma maneira geral, a determinação da resistência mecânica dos materiais deve se dar com base em critérios que permitam estabelecer as leis representativas do comportamento dos mesmos a partir de ensaios mecânicos como, por exemplo, os de tração e compressão simples, SZÜCS (1993).

Estes ensaios mecânicos são normalmente regidos por Normas Técnicas. No Brasil, para o caso das madeiras, a primeira Norma de ensaios surgiu oficialmente em

1940, através do Método Brasileiro MB-26. Atualmente a Norma que rege estes ensaios é a Norma Brasileira NBR 7190 versão 1997.

Entre os ensaios preconizados pela Norma Brasileira é interesse desta dissertação o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira, estabelecido no Anexo B, item B.8 da referida Norma. É importante, neste momento, esclarecer que este ensaio segue a mesma metodologia adotada pelo antigo MB-26, metodologia essa que foi desenvolvida para a Norma Americana em 1910 pelo *Forest Products Laboratory*, NORRIS (1957).

Sobre esta metodologia de ensaio MENDES (1984) cita o seguinte: “... este ensaio, realizado segundo o esquema da figura 1.2, está sujeito à influência da flexão devido a excentricidade entre a carga de cisalhamento e a reação de apoio. Esta flexão induz o aparecimento de tensões de tração normal ($\sigma_{\text{tração}}$) e de compressão normal ($\sigma_{\text{compressão}}$) ...”, às fibras da madeira.

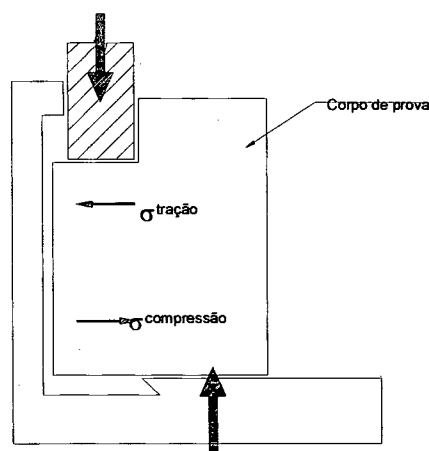


FIGURA 1.2 – Esforços internos em função da presença do binário. Fonte: MENDES (1984).

Ora, o conhecimento da resistência ao cisalhamento da madeira tem papel essencial no dimensionamento das ligações nas estruturas de madeira. E, segundo WILCOX et al. (1991), a resistência ao cisalhamento mede a capacidade da madeira de resistir a rupturas por ação de deslizar sobre ela mesma.

Entretanto, a clara constatação na literatura da influência da flexão no ensaio de cisalhamento da Norma Brasileira e, também, em algumas metodologias de ensaios propostas por outros pesquisadores, despertou interesse do autor para apresentar o estudo de um novo corpo-de-prova.

De qualquer forma, sabe-se, segundo LANG (1997), que qualquer um dos métodos de ensaio para cisalhamento incluem um ou mais dos problemas a seguir:

- ◆ Num plano desejado, o estado de cisalhamento puro nunca é obtido. Isto porque, somadas às tensões de cisalhamento irão surgir tensões normais no plano, assim como tensões ortogonais.
- ◆ A distribuição de tensões ao longo do plano de cisalhamento nunca é uniforme.
- ◆ Existe uma elevada tendência de ruptura à compressão quando o plano de cisalhamento desviar-se da direção das fibras.

Portanto, em razão destes problemas, pode-se reconhecer que os ensaios de cisalhamento são úteis para finalidades comparativas, no desafio de cada pesquisador estabelecer um método que apresente o menor distúrbio de tensões, menor variabilidade de resultados, aliado à praticidade do ensaio, ao invés de estabelecer verdadeiros valores de resistência.

1.2- Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo estudar o corpo-de-prova de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira utilizado no LEE, enfatizando-se suas vantagens e desvantagens em relação ao modelo adotado pela Norma Brasileira NBR 7190/97.

1.3- Objetivos Específicos

- ◆ Avaliar nos corpos-de-prova ensaiados a resistência ao cisalhamento, em função da posição dos anéis de crescimento.
- ◆ Determinar o teor de umidade das madeiras utilizadas nesta pesquisa através de dois métodos distintos: o ensaio normalizado da NBR 7190/97 e por meio de ensaio não destrutivo com o equipamento Sylvatest;

- ◆ Realizar ensaios de cisalhamento com o corpo-de-prova proposto nesta dissertação e o modelo preconizado pela Norma Brasileira NBR 7190/97, comparando-se suas resistências.

- ◆ Modelar por meio do Método dos Elementos Finitos os corpos-de-prova ensaiados experimentalmente neste trabalho, visualizando assim sua distribuição de tensões.

1.4- Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em 6 (seis) capítulos, sendo que o Capítulo 1 trata da **Introdução** ao assunto e da descrição dos objetivos do trabalho.

O Capítulo 2, denominado **Revisão Bibliográfica**, compreende o levantamento bibliográfico sobre as características anatômicas da madeira, do ponto de vista macro e microscópico. Apresenta a metodologia para o ensaio de cisalhamento preconizada pela Norma Brasileira e também algumas das principais normas internacionais. Abrange ainda a apresentação de trabalhos nacionais e estrangeiros, relacionados a propostas de ensaios para o cisalhamento da madeira. São incluídos os resultados e as principais conclusões de seus respectivos autores.

No Capítulo 3, **Corpo-de-prova Estudado**, é descrita a justificativa que motivou o autor a desenvolver este tema. É apresentado o corpo-de-prova proposto para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira com sua geometria e metodologia de ensaio.

O Capítulo 4, **Análise Experimental**, descreve os materiais utilizados e os ensaios realizados durante a pesquisa. Descreve além disto, a análise estatística dos resultados experimentais para as resistências ao cisalhamento nos corpos-de-prova. Compreende também a comparação múltipla de médias e o teste de Duncan entre os três modelos de corpos-de-prova e a análise comparativa entre a resistência ao cisalhamento no plano longitudinal-tangencial e longitudinal-radial. Por fim são apresentadas as conclusões e considerações finais da análise experimental.

No Capítulo 5, **Análise Numérica**, é apresentada uma revisão do Método dos Elementos Finitos (MEF) com a formulação em termos de deslocamentos. Também são descritos os elementos utilizados nas modelagens, bem como os modelos numéricos dos

três corpos-de-prova. Utilizando-se o programa SAP2000, obtém-se a distribuição de tensões nos diversos corpos-de-prova. Por fim são apresentadas as conclusões e considerações finais da análise numérica.

O Capítulo 6, **Conclusões e Recomendações**, abrange as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Introdução

O objetivo deste capítulo é descrever as características anatômicas da madeira, sob o ponto de vista macroscópico e microscópico. São apresentados os elementos constituintes deste material, analisando-se seu comportamento quando submetido a esforços nas diferentes direções principais. É dado destaque, também, à Norma Brasileira e a algumas das principais Normas para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Por fim, são apresentados alguns modelos de ensaios propostos por autores nacionais e internacionais, juntamente com seus resultados e considerações.

Inicialmente são introduzidos alguns conceitos utilizados neste trabalho e um breve resumo, apresentado em ordem cronológica, de cada literatura consultada cujo tema é diretamente ligado ao objetivo principal desta pesquisa.

2.1.1- Conceitos preliminares

Com a finalidade de estabelecer uma linguagem comum e facilitar a interação do leitor com o tema, são relacionados abaixo alguns conceitos presentes neste trabalho.

Cisalhamento paralelo: o cisalhamento paralelo ocorre quando a aplicação de um esforço ou componente de um esforço que provoca o cisalhamento, segue a direção paralela às fibras da madeira, isto é, na direção do eixo maior do caule.

Cisalhamento paralelo tangencial: o cisalhamento paralelo tangencial ocorre segundo um plano paralelo às fibras, perpendicular aos raios medulares e, ainda, tangente aos anéis de crescimento da madeira. O cisalhamento se dá ao longo das fibras, no plano denominado longitudinal-tangencial.

Cisalhamento paralelo radial: o cisalhamento paralelo radial ocorre segundo um plano paralelo às fibras, contendo os raios medulares da madeira e, ainda, perpendicular aos anéis de crescimento. O cisalhamento se dá ao longo das fibras, no plano denominado longitudinal-radial.

Plano de cisalhamento: é o plano, na madeira, onde ocorre o esforço de cisalhamento. No estudo do cisalhamento paralelo às fibras os dois planos principais são denominados por: longitudinal-radial e longitudinal-tangencial. Estes planos podem ser visualizados na figura 2.1.

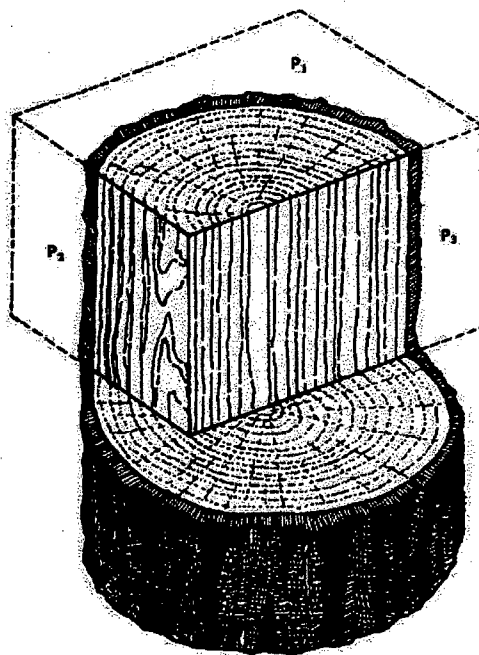


FIGURA 2.1 – Planos principais de observação de um caule. Plano transversal (P_1), plano longitudinal-tangencial (P_2) e plano longitudinal-radial (P_3). Fonte: WHITE (1980).

Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira: é definida, segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97, como a máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo-de-prova prismático.

Seção crítica de cisalhamento: é a provável seção onde ocorrerá a ruptura no corpo-de-prova por cisalhamento.

2.1.2- Resumo das principais literaturas consultadas

BROTERO (1935) apresenta o corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira adotado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. O autor realizou ensaios comparando resistências de cisalhamento, vantagens e desvantagens entre os dois corpos-de-prova: o adotado no IPT e o corpo-de-prova da Norma Americana ASTM D-142.

VIEIRA (1940) avaliou a resistência ao cisalhamento para diversas espécies de madeiras brasileiras, comparando dois dispositivos de ensaio: o adotado pela Norma Americana ASTM D-142 e outro, proposto pelo autor.

RADCLIFFE e SUDDARTH (1955) compararam as resistências ao cisalhamento entre o corpo-de-prova da Norma Americana ASTM D-143 e um corpo-de-prova em forma de viga, simplesmente apoiada, proposto pelos autores. Na segunda etapa deste estudo, analisaram experimentalmente nos corpos-de-prova, através do uso de strain gauges, a distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da seção crítica de cisalhamento.

NORRIS (1957) comparou os resultados das resistências ao cisalhamento para diversas espécies de madeiras, obtidos entre o corpo-de-prova da Norma Americana ASTM D-143 e um corpo-de-prova desenvolvido para ensaios em madeira compensada e, posteriormente, adaptado para madeiras sólidas, denominado corpo-de-prova painel.

BENDTSEN e PORTER (1978) realizaram estudos comparando o corpo-de-prova da Norma Americana ASTM D-143, de seção crítica de cisalhamento de 2" x 2" (50,8 x 50,8mm), com outro corpo-de-prova de geometria idêntica, porém de seção 2" x 1-1/2" (50,8 x 38,1mm). Avaliaram também as resistências ao cisalhamento nos corpos-de-prova nos planos longitudinal-radial, longitudinal-tangencial e com os anéis de crescimento a 45° com o plano de cisalhamento.

MENDES (1984) desenvolveu em sua dissertação um amplo estudo sobre a resistência da madeira ao cisalhamento. Verificou a influência dos planos de cisalhamento na resistência da madeira e comparou alguns ensaios de cisalhamento com

o modelo prescrito pelo Método Brasileiro MB-26 de 1940. O autor apresentou também uma proposta de dispositivo para o ensaio de cisalhamento com um corpo-de-prova cúbico.

FERREIRA (1994), a partir de resultados insatisfatórios com o corpo-de-prova do Método Brasileiro MB-26/1940 e incentivado com a elaboração da nova versão da Norma Brasileira NBR 7190, propôs um novo método para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

LANG (1997) apresenta para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira um corpo-de-prova que inicialmente, segundo o próprio autor, foi usado com sucesso para determinar a resistência das linhas de colagem na Madeira Laminada Colada (MLC). Lang realizou ensaios experimentais comparando os resultados obtidos com este modelo de corpo-de-prova e o modelo padrão da Norma Americana ASTM D-143.

HECK et al. (1998) avaliaram em corpos-de-prova o ensaio de torção como um método para determinar a resistência ao cisalhamento da madeira. Os autores analisaram as diferenças entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo ensaio da Norma Americana ASTM D 143 e as obtidas pelo método de torção.

MOREIRA e FASSONI (1998) avaliaram por meio de análise numérica através do método dos elementos finitos, a distribuição de tensões que ocorre nos ensaios de cisalhamento, seguindo-se as recomendações da Norma Brasileira NBR 7190/97. Adotaram modelos com comportamento elástico-linear ortotrópico e isotrópico e análise bidimensional no plano longitudinal-radial.

Os detalhes dos corpos-de-prova aqui mencionados serão apresentados nos itens 2.3 e 2.4.

2.2– Características Anatômicas da Madeira

HELLMEISTER (1983) nos ensina que para entender e explicar as características físicas e mecânicas da madeira, são necessárias noções claras a respeito de sua natureza; seu comportamento nas diversas solicitações mecânicas tem causas e limitações na própria constituição do material.

2.2.1– Classificação das madeiras

Basicamente, as madeiras têm sua classificação botânica dividida em dois grupos:

- madeiras de Gimnospermas;
- madeiras de Angiospermas.

Na classe das Gimnospermas existem as denominadas por coníferas, resinosas, não porosas ou “softwoods”. O termo não porosas refere-se, segundo CHIMELO (1986), à ausência de vasos ou “poros”. O Pinho do Paraná e o Pinho Bravo são, por exemplo, duas espécies de madeiras brasileiras nativas deste grupo.

As madeiras de Angiospermas são também denominadas por folhosas, porosas ou “hardwoods”. Neste grupo são as Dicotiledôneas que respondem, quase exclusivamente, pela produção de madeiras, CHIMELO (1986). A Peroba Rosa e o Mogno são, por exemplo, duas espécies de madeiras brasileiras nativas deste grupo.

Nesta dissertação serão utilizadas duas espécies de madeiras de floresta plantada, representando cada um dos grupos. O *Pinus elliottii* e o *Eucalyptus grandis*, pertencentes ao grupo das Gimnospermas e Angiospermas, respectivamente.

2.2.2– Estrutura macroscópica do tronco

O crescimento de uma árvore verifica-se, inicialmente, segundo a direção vertical ou axial. A cada ano há um novo crescimento vertical e a formação de camadas sucessivas de tecido resistente e condutor, dispostas em arranjos concêntricos, ao redor das camadas mais antigas.

Estas camadas, vistas em um corte transversal, constituem os anéis de crescimento. Neste corte é possível identificar uma região central, denominada medula, formada com madeira de características geralmente inferiores às da madeira propriamente dita.

O conjunto de anéis de crescimento representa o lenho, que é recoberto pela casca da árvore. Entre a casca e o lenho há uma camada muito delgada denominada de câmbio, onde originam-se os elementos anatômicos constituintes do lenho e da casca.

As camadas externas do lenho, mais claras, mais novas, vivas, com menor resistência mecânica, menos densas e que conduzem a seiva bruta das raízes até as folhas, são designadas alburno.

As camadas mais internas, mais escuras e mais antigas, que tendem a armazenar resinas, gomas, óleos, taninos e corantes, tornando-as assim mais resistentes mecânica e biologicamente são mais densas e designadas por cerne.

As camadas que constituem o lenho não apresentam desenvolvimento uniforme durante o ano. Na primavera e verão, como existe maior quantidade de calor e luz na atmosfera, a madeira é formada mais rápida e expansivamente, portanto suas fibras ficam com um diâmetro maior e de parede menos espessa, o que dá uma coloração mais clara e do ponto de vista mecânico, menos resistente. No outono e inverno, a atmosfera passa a ser mais fria, a ter menor intensidade de luz e com isso a madeira é formada mais lentamente e de forma mais ordenada, logo suas fibras ficam com um diâmetro menor e de parede mais espessa, o que dá uma coloração mais escura e do ponto de vista mecânico, de maior resistência, SZÜCS (1993).

O crescimento dessas camadas, segundo CHIMELO (1986), começa na primavera, e vai até um ou dois meses antes da queda das folhas no outono; no caso das plantas caducifólias. Portanto, no decorrer da estação de crescimento, uma completa camada de lenho novo é acrescida entre a casca e o lenho anteriormente formado. Num anel, a madeira inicialmente formada recebe o nome de lenho inicial, primaveril ou

precoce. E a madeira que se formou no fim do período é chamada de lenho tardio, de verão ou estival. Estas diferenciações são ilustradas na figura 2.2.

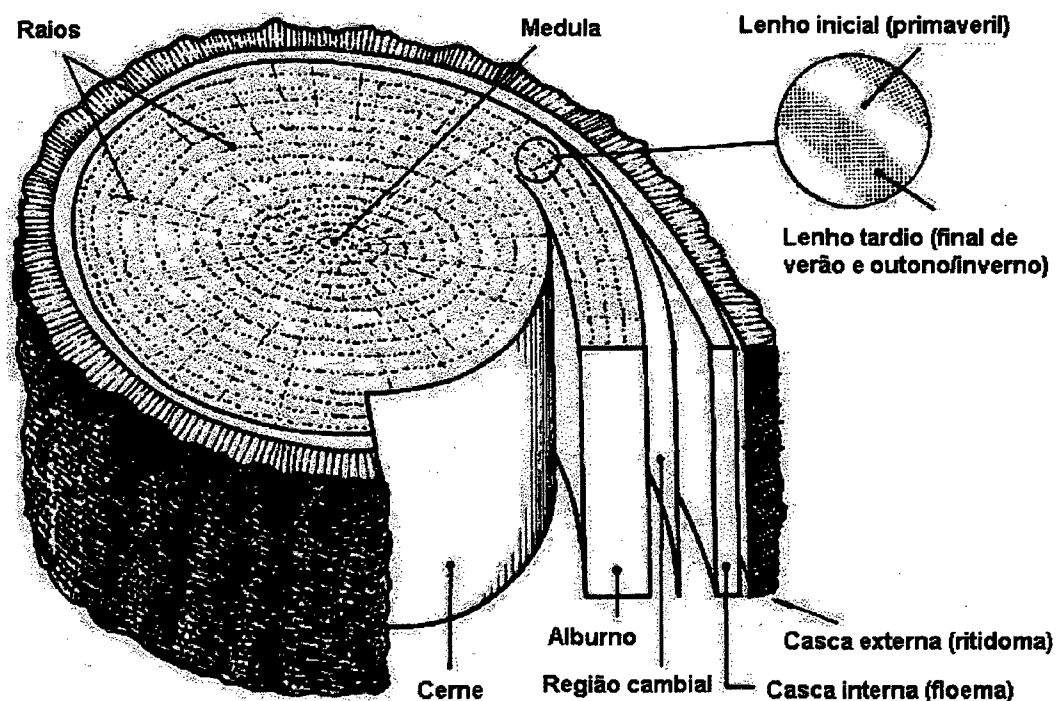


FIGURA 2.2 – Corte transversal de um tronco de árvore típico. Fonte: WHITE (1980).

2.2.3– Estrutura microscópica da madeira

As Gimnospermas (Coníferas), no reino vegetal, são exemplares primitivos, apresentando na sua madeira uma constituição anatômica mais simples e menos especializada. Consequentemente, a sua identificação, de acordo com BURGER e RICHTER (1991), tendo em vista o menor número de caracteres diagnósticos que oferecem, é mais difícil do que a madeira das Angiospermas.

Por outro lado, as Angiospermas (Dicotiledôneas) são vegetais mais evoluídos, apresentando uma composição anatômica bem mais especializada e complexa do que as Gimnospermas. Portanto, oferecem um número bem maior de caracteres para sua identificação.

Os elementos estruturais encontrados no lenho, da madeira das Coníferas e Dicotiledôneas, são apresentados a seguir.

2.2.3.1– Estrutura microscópica das Coníferas

Na madeira das coníferas podem ser identificados ao microscópio dois elementos básicos: traqueídes e raios medulares. Os traqueídes são células alongadas, com 3 a 5 mm de comprimento, 40 a 60 μm de diâmetro, seção transversal vazada de forma quadrada a sextavada com extremidades biseladas fechadas; comunicam-se pelas extremidades por meio de válvulas denominadas pontuações areoladas. Os traqueídes, segundo MOREY (1980) apud MASCIA (1991), constituem até 90% da madeira das coníferas.

Os raios medulares são conjuntos de células alongadas e achatadas que se dispõem radialmente em forma de fita, indo da casca ao centro da árvore. Estas células se comunicam com os traqueídes através de perfurações nas suas paredes, chamadas de pontuações simples. Os raios constituem até 10% da madeira das coníferas. A figura 2.3. apresenta um aspecto microscópico tridimensional da madeira de uma conífera.

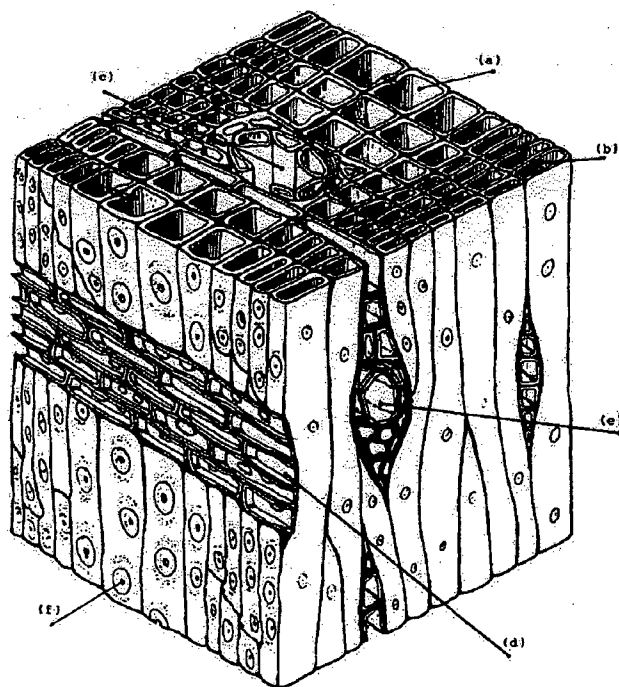


FIGURA 2.3. – Elementos constituintes das coníferas: (a) traqueídes na madeira de primavera e verão; (b) traqueídes na madeira de outono e inverno; (c) canal resinífero; (d) raio medular; (e) raio medular com canal resinífero; (f) pontuações. Fonte: GUITARD (1987).

2.2.3.2– Estrutura microscópica das Dicotiledôneas

Na madeira das dicotiledôneas, podem ser identificados ao microscópio três elementos básicos: vasos, fibras e raios medulares. Os vasos são chamados nos cortes transversais de poros e são células alongadas, com 0,2 a 1mm de comprimento, 20 a 300 μ de diâmetro, seção transversal vazada e arredondada. Os vasos alinham-se mais que os traqueídes e a comunicação entre as células é direta. Podem constituir de 20 até 50% da madeira das dicotiledôneas.

As fibras são células alongadas, com 0,7 a 1,4mm de comprimento, seção transversal vazada e arredondada, paredes espessas fechadas e afinando nas extremidades. Não possuem comunicação pelas extremidades, ligando-se aos vasos e às fibras por pontuações simples e areoladas. As fibras, segundo HELLMEISTER (1974) apud MASCIA (1991), podem constituir até 50% da madeira das dicotiledôneas.

Os raios medulares são conjuntos de células dispostos radialmente, indo da casca ao centro da árvore; tem estrutura mais complexa e variada que os raios das coníferas, ligam-se aos vasos e às fibras através de pontuações simples e areoladas.

A figura 2.4. apresenta um aspecto microscópico tridimensional da madeira de uma dicotiledônea.

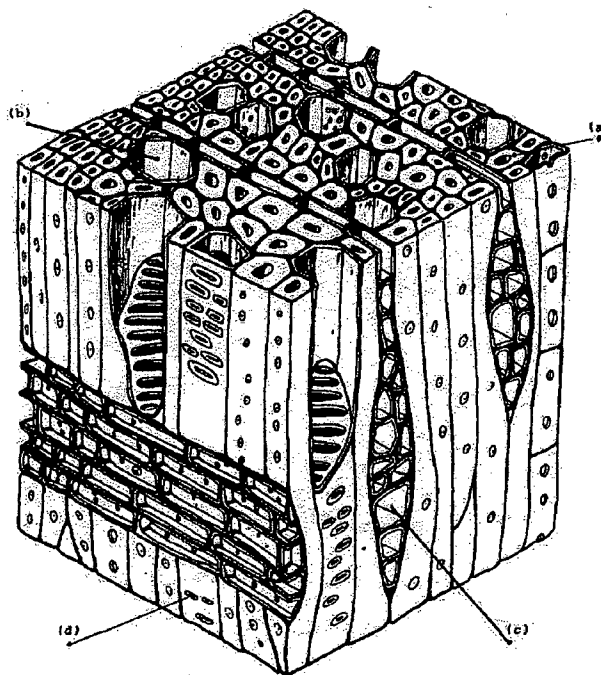


FIGURA 2.4. – Elementos constituintes das dicotiledôneas: (a) fibras; (b) vasos; (c) raios medulares; (d) pontuações. Fonte: GUITARD (1987).

2.2.4– Comportamento mecânico da madeira no nível das direções principais

A madeira é um material fornecido pela natureza, formado dentro de um processo fisiológico de crescimento. Em consequência disso, possui características particulares em sua constituição que, segundo SZÜCS (1995), tornam a madeira um material distante de ser homogêneo, isotrópico ou simétrico.

Logo, considerando-se esta constituição natural, a madeira do tronco das árvores apresenta três direções principais: a longitudinal (L) que tem perpendicular a ela, duas outras, uma radial (R) que sai da medula para a casca e uma tangencial (T) contida no plano tangente aos anéis de crescimento. Como em cada ponto estas três direções são ortogonais entre si, diz-se que a madeira é um material ortotrópico, SZÜCS (1995). O Modelo simplificado da estrutura anatômica da madeira mostrado na figura 2.5 apresenta estas direções.

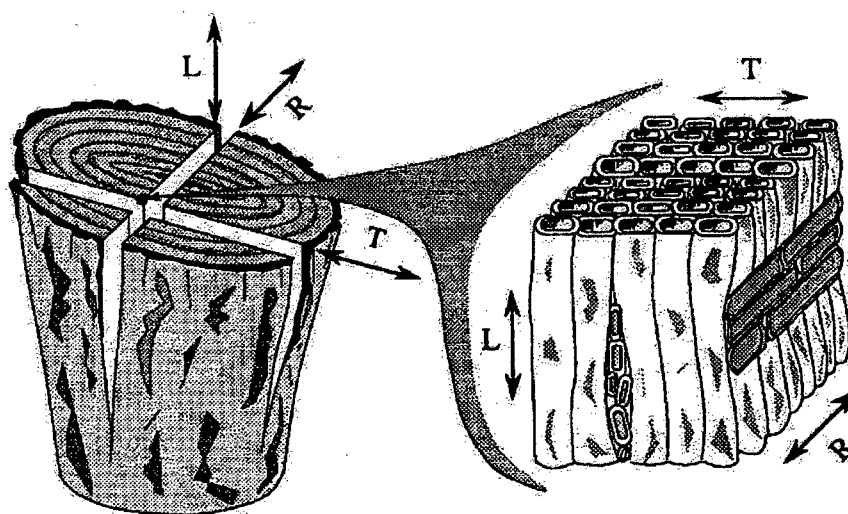


FIGURA 2.5 – Disposição dos elementos anatômicos da madeira. Fonte: SZÜCS (1991).

MASCIA (1991) comprovou, através de ensaios de compressão uniaxial em corpos-de-prova, carregados em diferentes direções, a adequação da hipótese do comportamento da madeira como material ortotrópico.

Tem-se ainda que, por circunstâncias naturais, as fibras da madeira estão orientadas, de maneira preferencial, na direção longitudinal do crescimento da árvore. Estas fibras representam mais de 90% da massa que constitui a madeira, MASCIA

(1991) e SZÜCS (1991). Assim, pode-se idealizar a madeira como um material composto por feixes de tubos capilares, formados em camadas concêntricas, a partir da medula e que são cruzados transversalmente por pequenos feixes posicionados na direção radial do tronco, denominados, por raios medulares.

Analisando este entrelaçamento de feixes de tubos capilares é que pode-se compreender a diferença do comportamento físico-mecânico da madeira segundo as três direções principais, dadas naturalmente no momento de sua formação.

Portanto, tem-se segundo SZÜCS (1991) que, para um material com esta constituição é de se esperar uma resistência mecânica muito maior aos esforços na direção longitudinal, que para os mesmos esforços localizados nas direções radial ou tangencial. Esta resistência muito mais elevada às solicitações na direção longitudinal é dada pela presença preponderante das fibras, orientadas nesta direção.

Por outro lado, se a solicitação está disposta transversalmente às fibras, isto é, nas direções radial ou tangencial, pode-se imaginar a tendência de esmagamento destes feixes de tubos capilares, para esforços de compressão, ou arrancamento lateral destes tubos, para esforços de tração. As figuras 2.6 e 2.7 apresentam, em detalhe, esta constituição da madeira nos planos longitudinal-tangencial e longitudinal-radial, respectivamente.

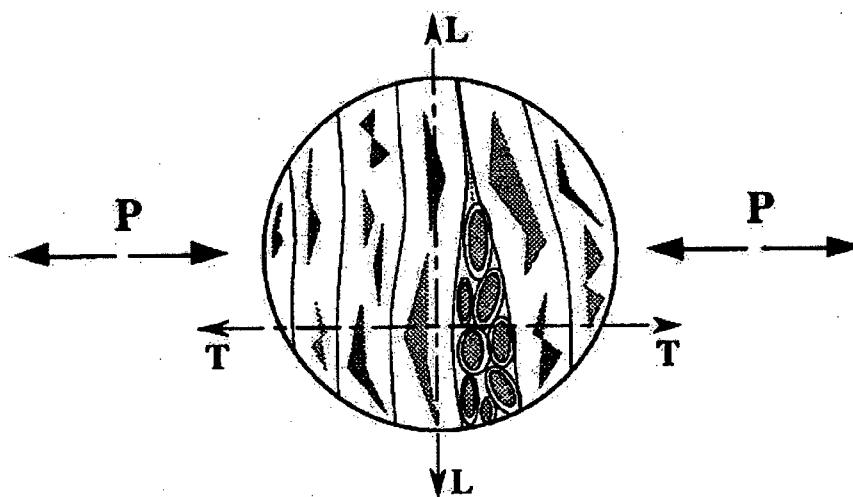


FIGURA 2.6 – Disposição das fibras da madeira no plano longitudinal-tangencial.
Fonte: SZÜCS (1991).

Em virtude da própria natureza da composição interna da madeira, existe uma pequena mas superior resistência do material quando solicitado na direção radial, se comparada com uma igual solicitação na direção tangencial. Isto pode ser explicado

pela presença dos raios medulares que, devido o seu posicionamento paralelo à direção da solicitação e, ainda, cruzando-se com as fibras longitudinais, oferecem à direção radial uma resistência um pouco superior, SZÜCS (1993).

Assim, pode-se concluir, com base nas figuras 2.6 e 2.7, que para solicitações na direção tangencial, haverá a tendência de um esmagamento ou arrancamento lateral, seja das fibras longitudinais, ou dos raios medulares.

Por outro lado, para uma solicitação na direção radial haverá a tendência de um esmagamento ou arrancamento das fibras longitudinais, porém, neste plano, a resistência da madeira é reforçada pela presença dos raios medulares, dispostos paralelos à solicitação.

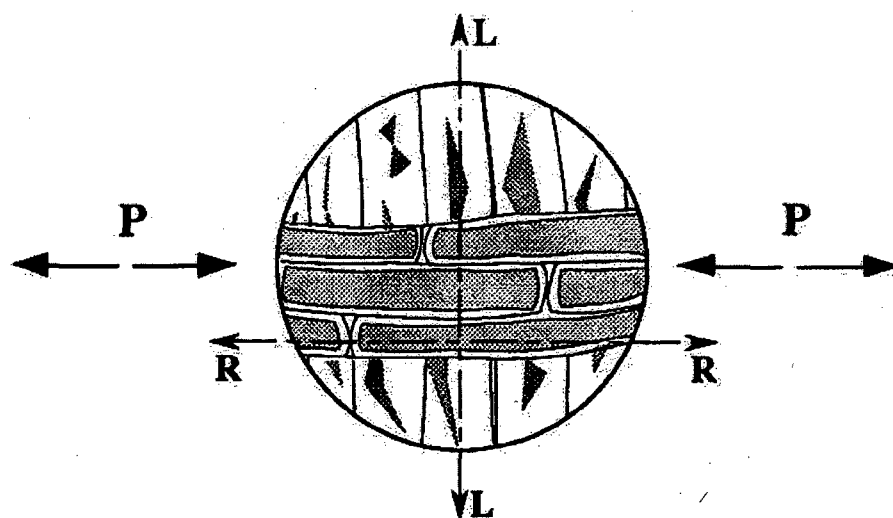


FIGURA 2.7 - Disposição das fibras da madeira no plano longitudinal-radial. Fonte: SZÜCS (1991).

2.2.5– Considerações sobre a ortotropia da madeira

A aplicação da teoria da elasticidade à madeira está orientada, segundo HEARMON (1948) apud MASCIA (1991), na hipótese da simetria elástica de três planos perpendiculares entre si, vinculados à sua estrutura interna e na homogeneidade macroscópica do material.

Porém, ao se analisar o tronco de uma árvore, encontramos, por causa das características particulares de seu crescimento, nós, excentricidades e outros defeitos naturais, figura 2.8 (a). Agora, ignorando-se estas características, o tronco pode ser

referenciado a um sistema de coordenadas cilíndricas, sendo o eixo longitudinal do tronco, denominado por L , a orientação na direção dos raios medulares, R e a curvatura dos anéis de crescimento, denominada por C , figura 2.8 (b).

Em razão disto, a superfície radial-tangencial (gerada por uma linha movendo-se ao longo dos anéis de crescimento e pelos raios medulares) não é plana, mas de forma cilíndrica. Por outro lado, os outros dois planos, longitudinal-radial e longitudinal-tangencial, são mais verdadeiramente planos, com eventuais irregularidades em virtude do crescimento natural da árvore, figura 2.8 (c). Desta maneira, a solução do problema necessita a transformação dos parâmetros elásticos de coordenadas cilíndricas para cartesianas ou o inverso, MASCIA (1991).

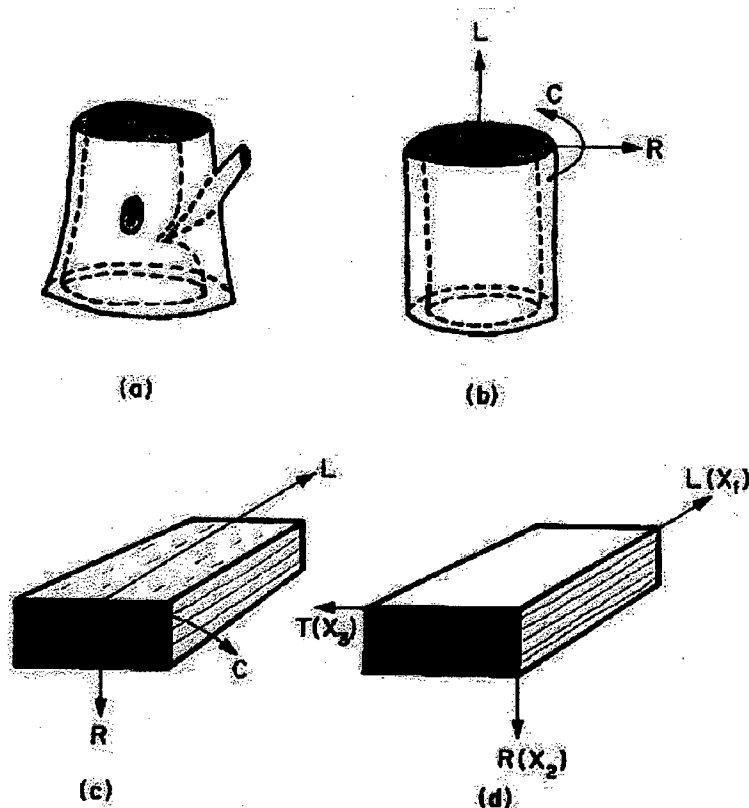


FIGURA 2.8 – Eixos de simetria elástica em uma peça de madeira. Fonte: BODIG e JAYNE (1982).

Entretanto, na maioria da resolução dos problemas, ao se analisar uma peça de madeira serrada, retirada do tronco, isenta de defeitos, de acordo com a figura 2.8 (d), esta é, considerada como referida a um sistema de coordenadas cartesianas, x_i . Assim, os eixos geométricos x_1 , x_2 , e x_3 coincidem com os eixos de simetria elástica, chamados de eixos ortotrópicos L , R e T , BODIG e JAYNE (1982).

2.3- Normas para Ensaio de Cisalhamento

2.3.1- Norma Brasileira

A Norma Brasileira NBR-7190 (1997) especifica o dispositivo da figura 2.9 para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. O corpo-de-prova deve ser isento de defeitos e confeccionado com o plano da seção crítica paralelo à direção radial da madeira (normal ao eixo 3), de acordo com a figura 2.10.

O carregamento deve ser aplicado a uma taxa crescente e constante, correspondente a 2,5MPa por minuto.

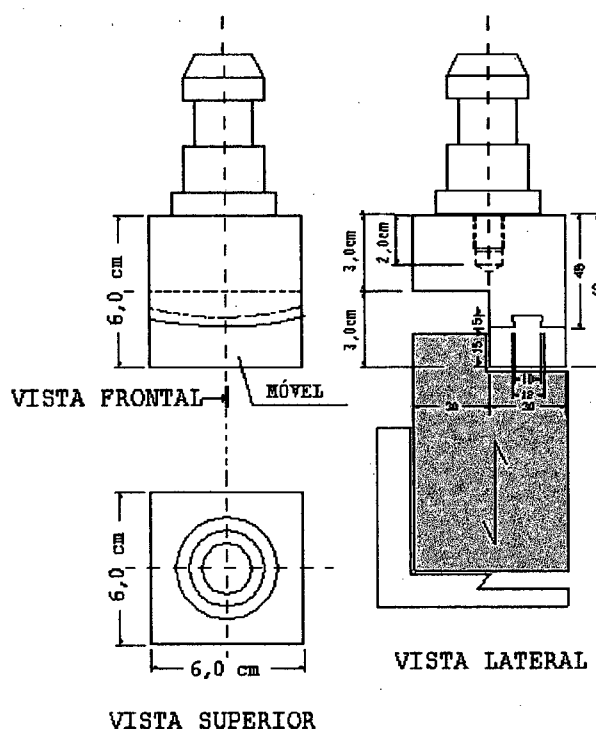


FIGURA 2.9 – Dispositivo para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.
Fonte: NBR-7190/97.

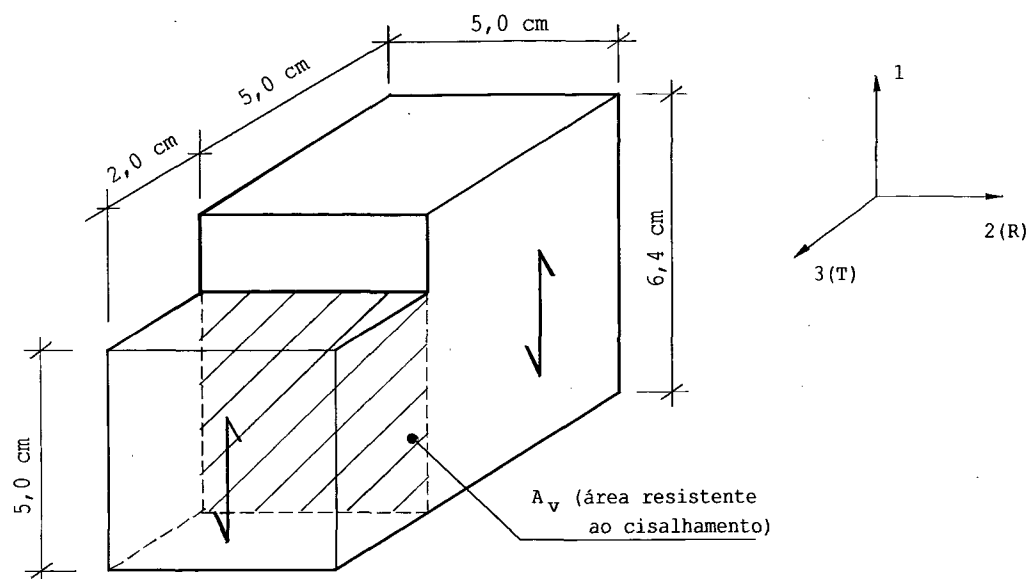


FIGURA 2.10 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: NBR-7190/97.

A Norma estabelece que “... Os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo entre 10% e 20%, devem ser apresentados com os valores corrigidos para a umidade padrão de 12% ...” através da expressão 2.1.

$$\tau_{12} = \tau_{U\%} \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (2.1)$$

2.3.2- Norma Portuguesa

A Norma Portuguesa NP-623 (1973) especifica o dispositivo da figura 2.11 para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. O corpo-de-prova deve ser isento de nós e outro defeitos e apresentar a geometria indicada na figura 2.12.

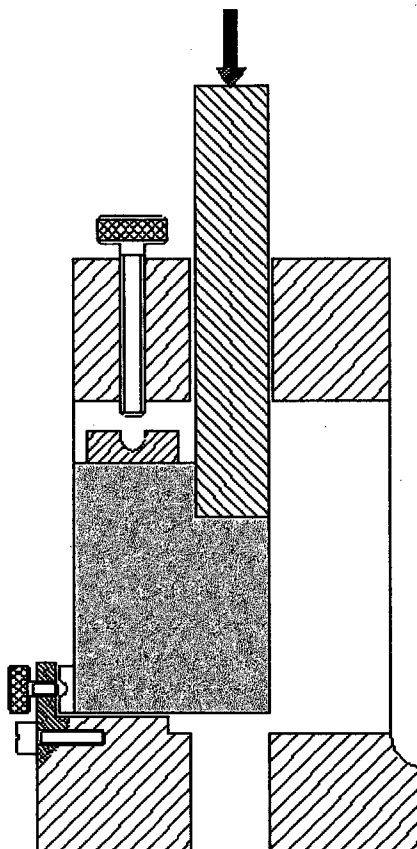


FIGURA 2.11 – Dispositivo para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: NP-623/73.

O corpo-de-prova pode ser confeccionado com o plano de cisalhamento paralelo à direção radial ou tangencial, porém o valor da resistência ao cisalhamento deve ser apresentado acompanhado da direção do plano.

O carregamento deve ser aplicado a uma taxa crescente e constante até atingir a ruptura do corpo-de-prova, em tempo aproximado de 3 minutos. A Norma especifica que se a ruptura no corpo-de-prova não ocorrer no plano de cisalhamento ou numa seção próxima, deve-se repetir o ensaio.

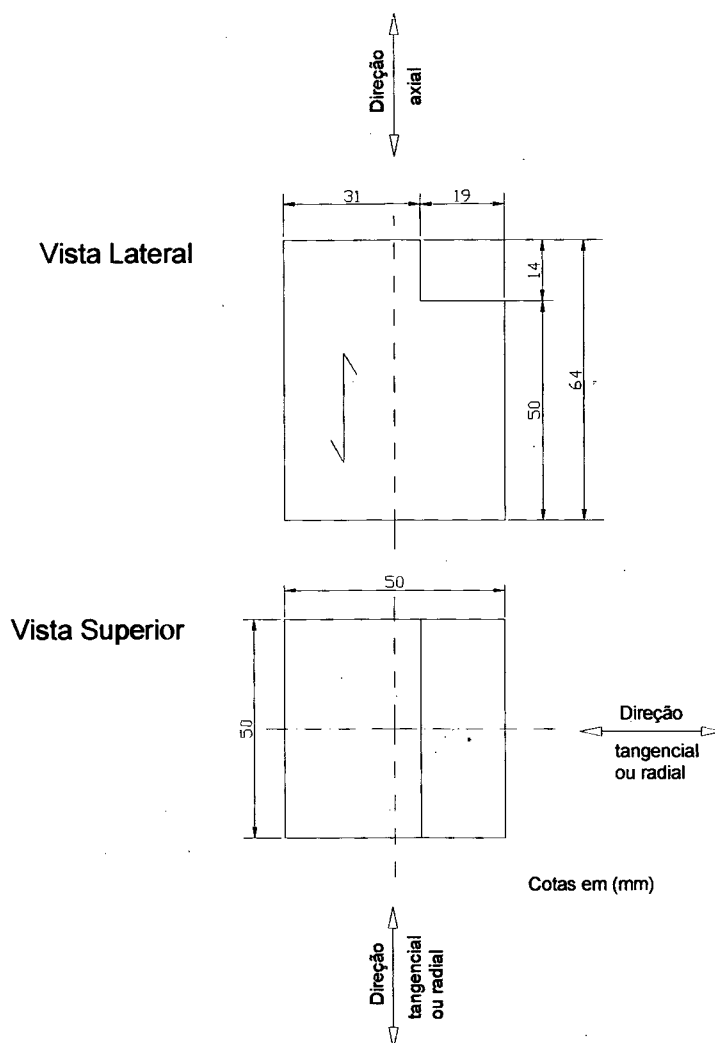


FIGURA 2.12 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte NP-623/73.

A Norma estabelece que os resultados das resistência de cisalhamento, obtidos em corpos-de-prova com teor de umidade contidos no intervalo entre 9% e 15%, podem ser corrigidos para a umidade padrão de 12% através da expressão 2.2:

$$\tau_{12} = \tau_{U\%} [1 + k_5 (U\% - 12)] \quad (2.2)$$

sendo k_5 um coeficiente determinado graficamente como o coeficiente angular da reta tangente, no ponto correspondente à 12% de umidade, do diagrama teor de umidade versus resistência ao cisalhamento, extraído do ensaio de 10 corpos-de-prova, preferencialmente do mesmo barrote e levados a teores de umidade compreendidos

entre 9% a 15%. De acordo com a própria Norma geralmente considera-se, o valor de 0,05 para k_5 .

2.3.3- Norma Americana

A Norma Americana ASTM D 143 (1983) especifica o dispositivo da figura 2.13 para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. O corpo-de-prova deve ser isento de nós e outros defeitos e apresentar a geometria da figura 2.14.

Os corpos-de-prova devem ser confeccionados em pares, metade com o plano da seção crítica paralelo à direção radial e metade com o plano da seção crítica de cisalhamento paralelo à direção tangencial.

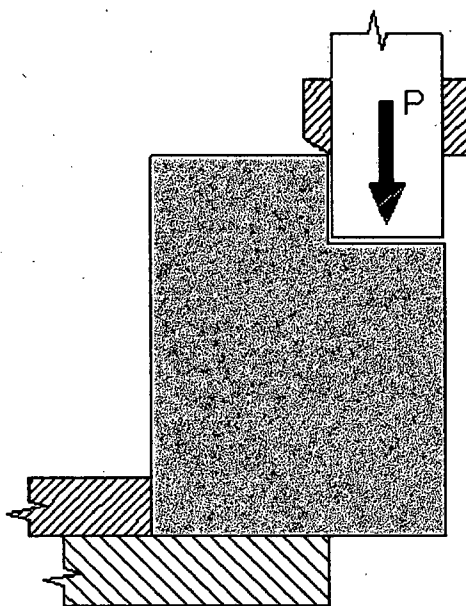


FIGURA 2.13 – Detalhe do dispositivo para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: KOLLMANN e CÔTÉ (1984).

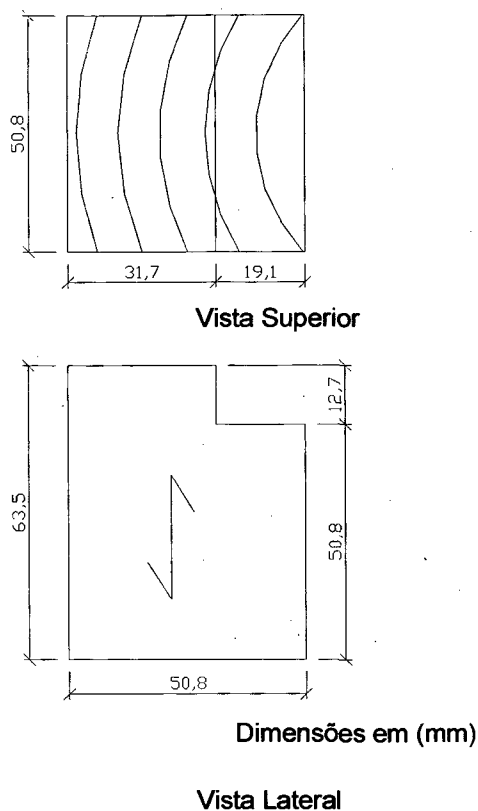


FIGURA 2.14 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: ASTM D 143/83.

O carregamento deve ser aplicado a uma taxa crescente e constante, correspondente ao deslocamento vertical do cutelo aplicador da carga de 0,6mm por minuto. A Norma especifica que os ensaios em que a superfície de ruptura estender-se para a região do apoio devem ser desprezados.

2.3.4- Norma ISO

A Norma ISO 3347 (1976) especifica que o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira deve ser realizado através de carregamento de compressão.

O corpo-de-prova pode ser confeccionado com o plano da seção crítica paralelo à direção radial ou paralelo à direção tangencial. Porém, deve-se no relatório indicar a direção do plano e o desenho do corpo-de-prova indicando-se a orientação das fibras.

A Norma não especifica a geometria exata do corpo-de-prova. Apenas estabelece que a espessura do corpo-de-prova e o comprimento do plano de cisalhamento podem variar entre 20 e 50mm.

O carregamento deve ser aplicado a uma taxa crescente e constante até atingir a ruptura do corpo-de-prova, em um tempo entre 1,5 e 2,0 minutos.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo entre 9% e 15%, devem, quando necessário, ser apresentados com os valores corrigidos para a umidade padrão de 12% através da expressão 2.3:

$$\tau_{12} = \tau_{U\%} \cdot [1 + \alpha \cdot (U\% - 12)] \quad (2.3)$$

onde α é um fator de correção para o teor de umidade, o qual deve ser obtido das normas nacionais.

2.3.5- Norma Pan-americana

A Norma pan-americana COPANT 463 (1972) especifica seu procedimento de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira análogo ao adotado pela Norma Americana ASTM D 143, item 2.3.3. A geometria do corpo-de-prova pode ser vista na figura 2.14 e um esquema do dispositivo, adotado pela Norma, encontra-se na figura 2.13.

O carregamento deve ser aplicado a uma taxa crescente e constante de 0,6mm por minuto, na superfície de 19,1x50,8mm², a uma distância de 3,0mm da aresta.

O corpo-de-prova deve ser isento de defeitos e confeccionados metade com o plano da seção crítica paralela à direção radial e metade paralela à direção tangencial.

A Norma especifica que os ensaios em que a superfície de ruptura estender-se para a região do apoio devem ser desprezados.

2.3.6- Norma Francesa

A Norma Francesa B 51-012 (1942) especifica um procedimento de tração no corpo-de-prova, mostrado na figura 2.15, para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. O corpo-de-prova deve ser isento de defeitos e apresentar a geometria indicada na figura 2.16.

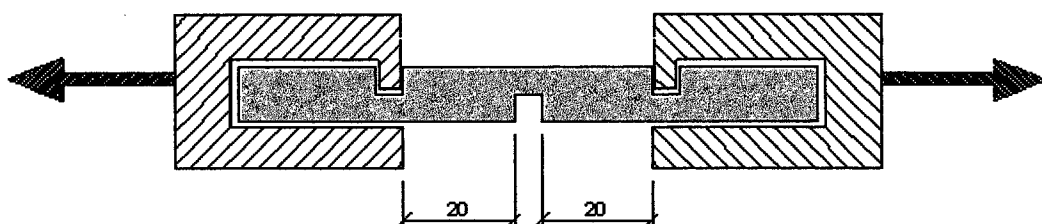


FIGURA 2.15 - Dispositivo para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: PLUVINAGE (1992).

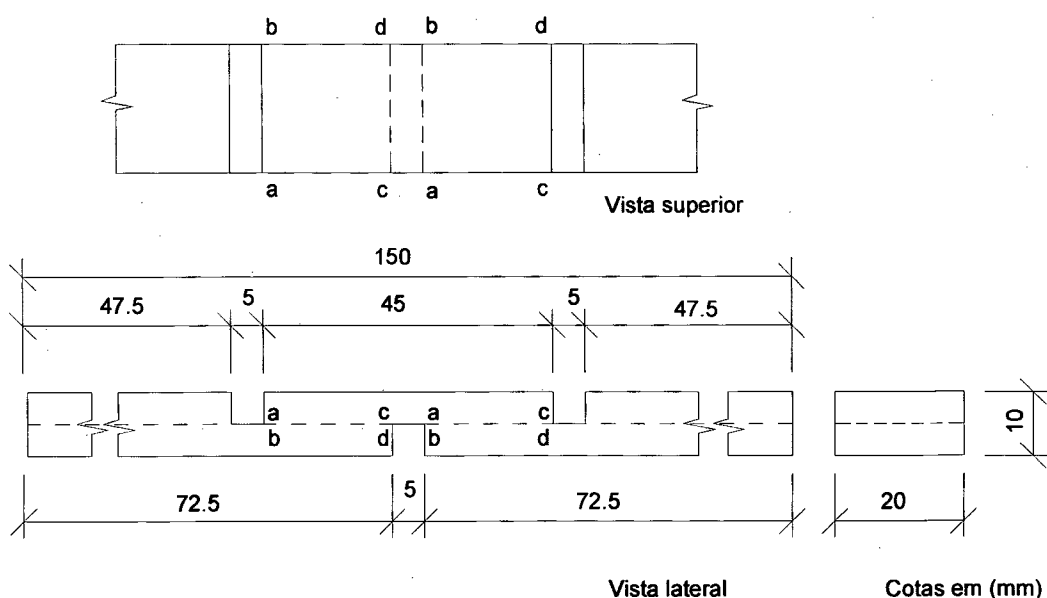


FIGURA 2.16 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: B 51-012/42.

A superfície teórica de cisalhamento é definida por um dos retângulos *abcd*, com área nominal de $4,0 \text{ cm}^2$.

O corpo-de-prova deve ter um teor de umidade de $15\% \pm 1\%$. A velocidade do ensaio não deve ser superior a 400 Kgf por minuto. Os corpos-de-prova em que a

ruptura não ocorrer por cisalhamento, localizado no retângulo *abcd*, devem ser eliminados.

2.4- Estudos entre Métodos de Ensaio para Cisalhamento na Madeira

2.4.1- Estudo de BROTERO (1935)

Brotero analisou o corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira adotado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. O autor realizou ensaios, em diversas espécies de madeiras, comparando este corpo-de-prova, mostrado na figura 2.17, com o corpo-de-prova da Norma Americana ASTM D 142, apresentado na figura 2.14 (ASTM D 143).

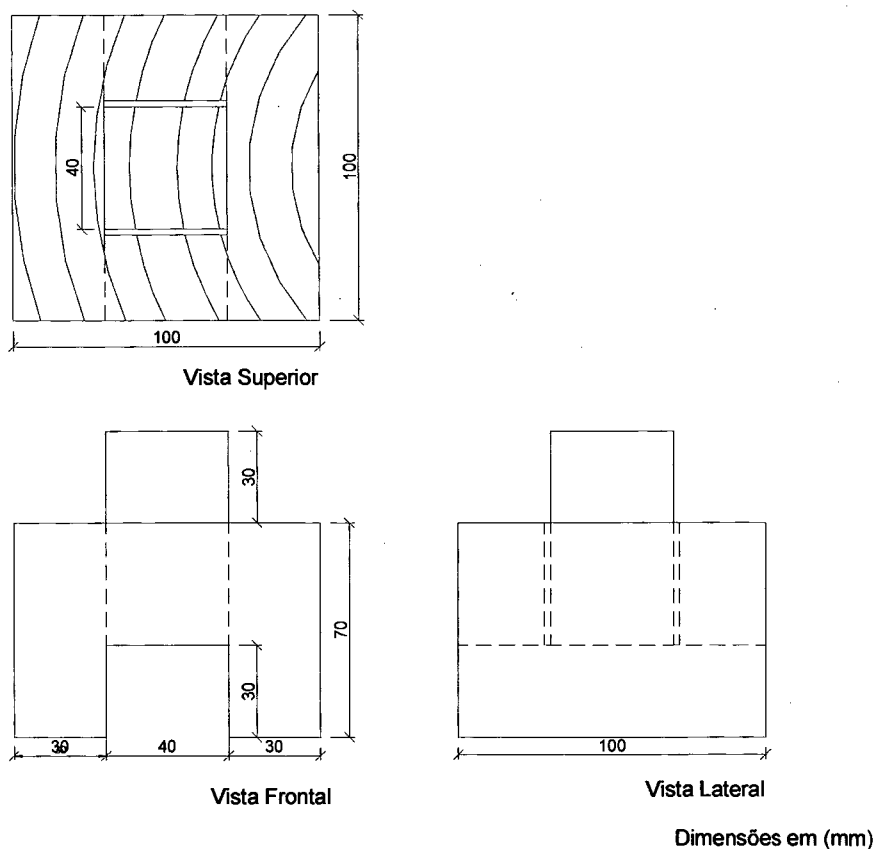


FIGURA 2.17 – Corpo-de-prova adotado pelo IPT.

Os resultados destes ensaios, segundo Brotero, apresentaram-se satisfatórios, com os valores entre as resistências ao cisalhamento praticamente equivalentes.

O autor concluiu que o corpo-de-prova da Norma Americana apresenta algumas vantagens sobre o corpo-de-prova do IPT, principalmente sob o ponto de vista de execução e secagem. Em virtude disto, Brotero adotou o corpo-de-prova Americano para os ensaios de cisalhamento do IPT.

Possivelmente, em razão deste trabalho, o modelo do ensaio prescrito pela Norma Americana começou a ser utilizado no Brasil. Posteriormente, foi adotado oficialmente através do Método Brasileiro MB-26 em 1940.

2.4.2– Estudo de VIEIRA (1940)

Vieira comparou as resistências ao cisalhamento de algumas espécies de madeiras, empregando dois dispositivos de ensaio: o adotado pela Norma Americana ASTM D 142, figura 2.14, também utilizado no IPT, e o proposto pelo autor.

O corpo-de-prova proposto por Vieira, adaptado à máquina Universal de Amsler, tem área nominal na seção crítica de cisalhamento de 16 cm^2 , compatível com a capacidade da máquina de ensaio. Na figura 2.18 são mostrados o corpo-de-prova e o dispositivo de ensaio propostos pelo autor.

Para que estes resultados fossem suscetíveis de comparação, os corpos-de-prova foram localizados e retirados alternadamente ao longo de uma mesma barra na sua direção longitudinal, tendo-se procurado ainda localizar o plano de ruptura numa mesma camada de crescimento.

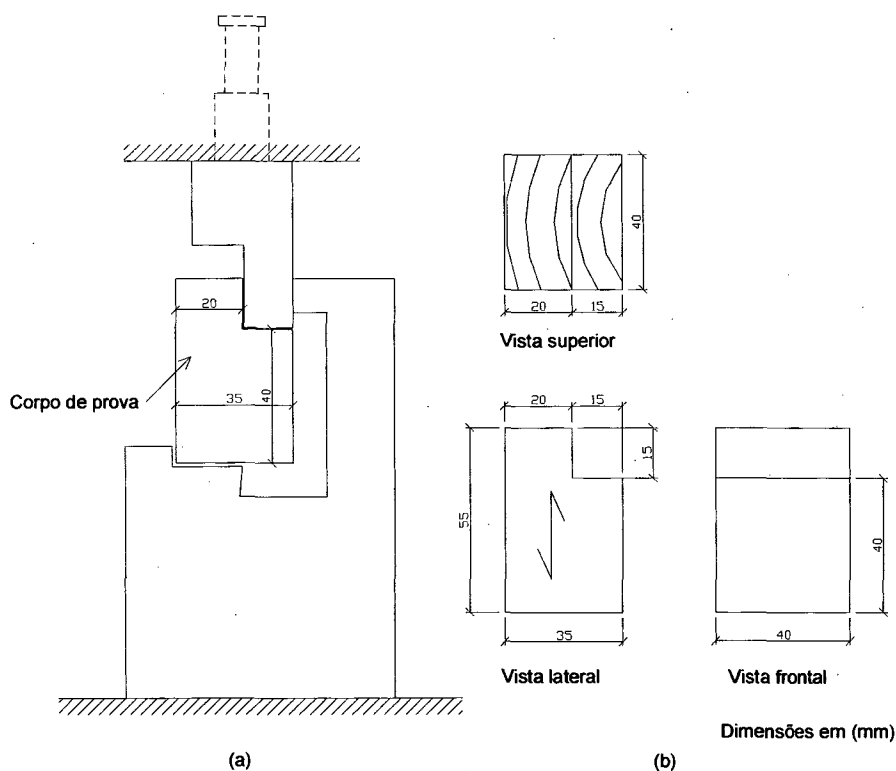


FIGURA 2.18 – (a) Dispositivo de ensaio e (b) corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

O resumo dos resultados, fornecidos na tabela 2.1, foram obtidos por Vieira a partir da média das resistências de cisalhamento dos corpos-de-prova para cada espécie de madeira.

TABELA 2.1 – Valores dos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras da madeiras obtidos por VIEIRA (1940).

Espécie de madeira	Dispositivo adotado pela Norma Americana ASTM		Dispositivo proposto adaptado à máquina Universal de Amsler	
	Resistência ao cisalhamento (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência ao cisalhamento (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Canela da Serra	10,4	0,4	11,4	0,6
Peroba Rosa	11,1	0,8	10,9	0,4
Pinho do Paraná	10,8	0,8	11,2	0,5
Jacarandá	12,7	0,6	12,9	0,5
Buruci	7,4	0,2	7,4	0,4
Pau Marfim	13,0	0,2	12,7	0,4
Coerana	9,1	0,4	8,2	0,3

Embora os resultados, mostrados na tabela 2.1, apresentem-se aparentemente satisfatórios, Vieira não apresentou em seu trabalho nenhuma conclusão nem discussão destes resultados.

2.4.3– Estudo de RADCLIFFE e SUDDARTH (1955)

Radcliffe e Suddarth apresentam duas propostas de substituição do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira para a Norma ASTM D 143, item 2.3.3. Na primeira, o corpo-de-prova padrão da Norma Americana é substituído por um corpo-de-prova em forma de viga, denominado ensaio de cisalhamento da viga dentada. Na segunda proposta, o corpo-de-prova americano é substituído por outro de geometria semelhante, portanto, é denominado, corpo-de-prova padrão modificado.

O corpo-de-prova padrão modificado, figura 2.19, apresenta na sua geometria uma fenda para, segundo Radcliffe e Suddarth, reduzir as concentrações de tensões no canto, em razão do dente. O procedimento deste ensaio é o mesmo da Norma Americana, já descrito anteriormente.

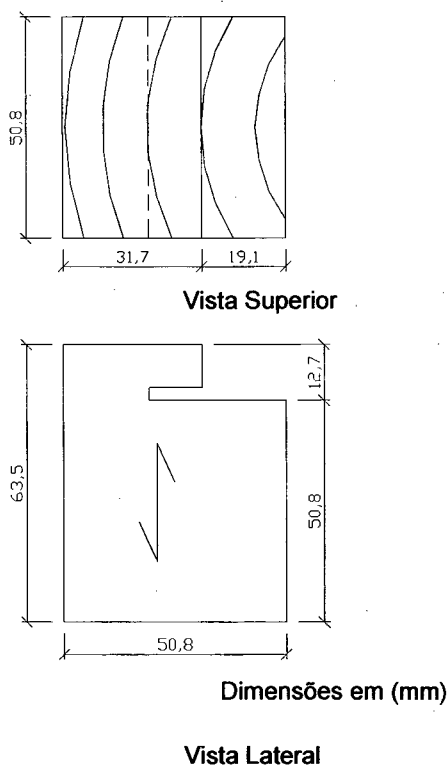


FIGURA 2.19 – Corpo-de-prova padrão modificado.

O corpo-de-prova da viga dentada é mostrado na figura 2.20. O dispositivo deste ensaio, apresentado na figura 2.21, consiste de uma viga simplesmente apoiada carregada no centro do vão.

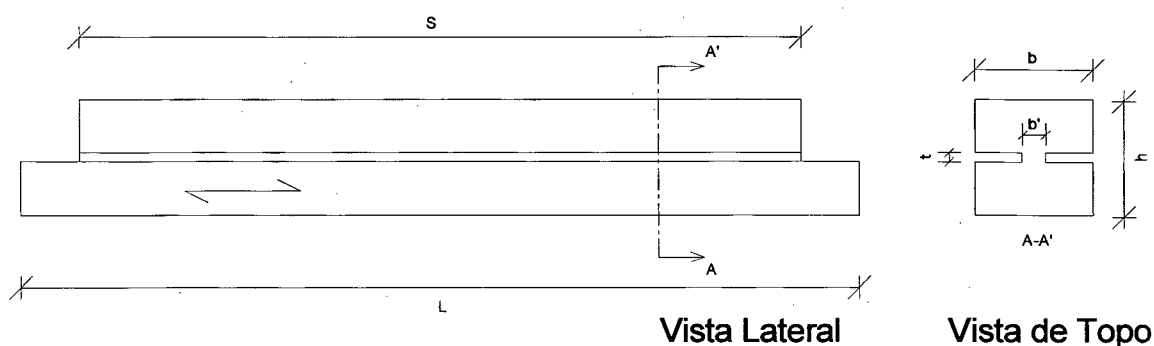


FIGURA 2.20 – Corpo-de-prova da viga dentada; ($L \approx 35,60$ cm, $S \approx 30,50$ cm, $b = h \approx 5,10$ cm, $b' \approx 1,30$ cm e $t \approx 0,40$ cm).

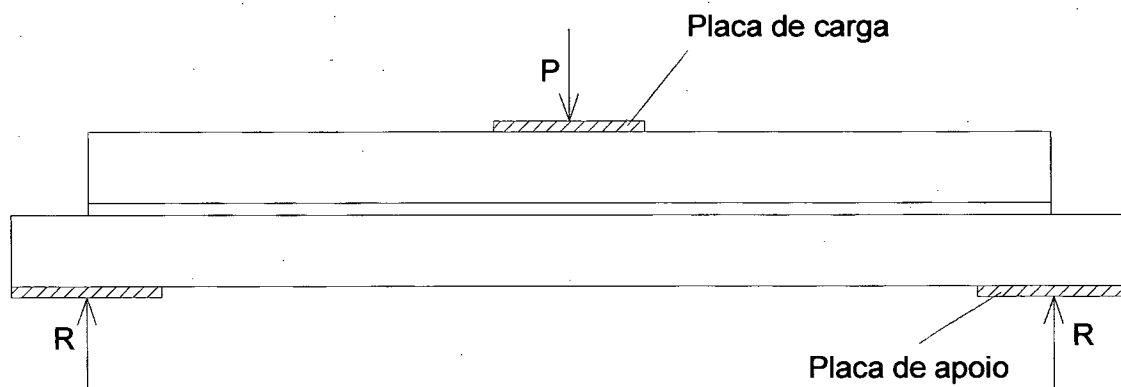


FIGURA 2.21– Esquema do ensaio da viga dentada.

Os autores realizaram ensaios, em diversas espécies de madeiras, comparando as resistências ao cisalhamento entre o corpo-de-prova padrão da Norma Americana, o corpo-de-prova padrão modificado e o corpo-de-prova da viga dentada. Na tabela 2.2 encontram-se resumidos estes valores.

TABELA 2.2 – Comparação da resistência ao cisalhamento entre os diferentes corpos-de-prova, RADCLIFFE e SUDDARTH (1955).

Espécie	Ensaios comparados	Umidade (%)	Relação $\overline{\tau_1}/\overline{\tau_2}$
Yellow Poplar	ASTM x Viga dentada	6,0	1,31
White Ash	ASTM x Viga dentada	6,0	1,35
Soft Maple	ASTM x Viga dentada	6,0	1,33
Red Oak	ASTM x Viga dentada	6,0	1,11
Douglas-fir	ASTM x ASTM Modificado	12,0	1,52
Douglas-fir	ASTM x ASTM Modificado	12,0	1,31
Yellow Poplar	ASTM x ASTM Modificado	6,0	1,50
Western Hemlock	ASTM x ASTM Modificado	6,0	1,89
Red Oak	ASTM x ASTM Modificado	6,0	1,10
32 espécies	ASTM x ASTM Modificado	6,0	1,54

Sendo, $\overline{R} = \overline{\tau_1} / \overline{\tau_2}$ em que $\overline{\tau_1}$ é a média das resistências ao cisalhamento dos corpos-de-prova da viga dentada ou do ASTM modificado; $\overline{\tau_2}$ é a resistência média para o corpo-de-prova da Norma Americana.

Na segunda fase do trabalho, Radcliffe e Suddarth mediram no corpo-de-prova da ASTM e no corpo-de-prova modificado, através do uso de strain gauges, a distribuição das tensões de cisalhamento ao longo da seção crítica em quatro pontos (A-D), indicados na figura 2.22.

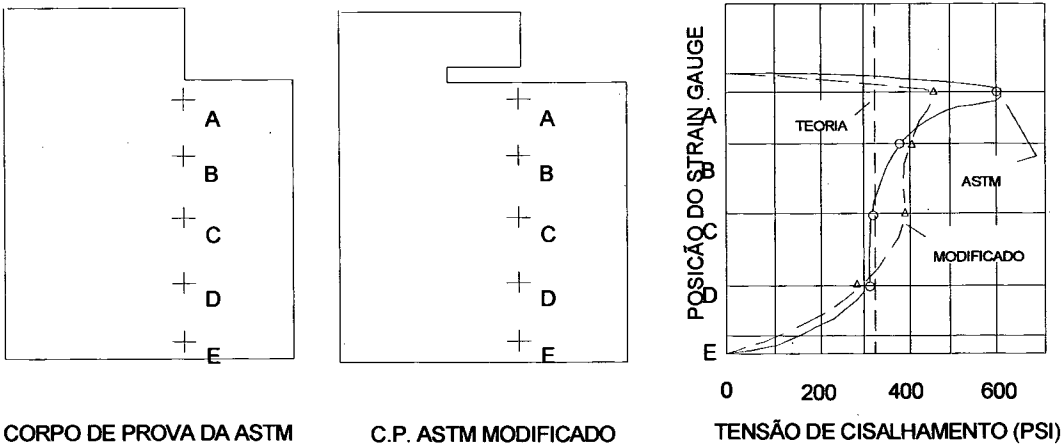


FIGURA 2.22 – Distribuição das tensões de cisalhamento no corpo-de-prova padrão da ASTM e ASTM modificado; (1 psi ≈ 0,006895 MPa).

Os autores concluíram que o corpo-de-prova padrão da Norma Americana foi melhorado através da introdução da fenda no canto da aresta. Porém, este não é

recomendado, pois as rupturas de cisalhamento são frequentemente produzidas por rupturas de tração normal às fibras.

Além disto a máxima tensão de cisalhamento no corpo-de-prova da Norma Americana é muito maior que a resistência calculada ($\tau = P/A$). No corpo-de-prova modificado, a influência da fenda para reduzir a máxima tensão de cisalhamento é considerável. A distribuição das tensões de cisalhamento no corpo-de-prova modificado, ao longo da seção crítica, é mais uniformemente distribuída.

Outra questão importante diz respeito às resistências ao cisalhamento, obtidas entre os ensaios da Norma Americana e da viga dentada. Os resultados permitiram aos autores afirmar que a madeira possui resistência ao cisalhamento substancialmente mais elevada do que a encontrada pela Norma ASTM D 143.

Ora, possivelmente, estas resistências mais baixas se devem ao fato que o corpo-de-prova padrão da Norma Americana, como os próprios autores mencionam, produzem rupturas por cisalhamento associadas à tração normal às fibras.

2.4.4– Estudo de NORRIS (1957)

Norris comparou, para diversas espécies de madeiras, as resistências ao cisalhamento entre o corpo-de-prova da Norma Americana ASTM D 143 e um corpo-de-prova de espessura fina, cortado em formato de cruz, denominado corpo-de-prova painel de cisalhamento. O corpo-de-prova e o dispositivo de ensaio são mostrados na figura 2.23.

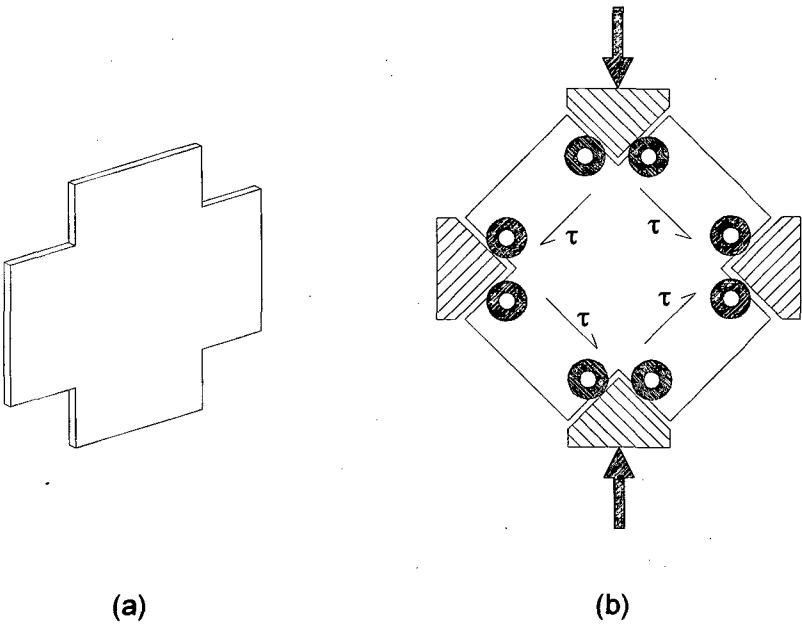


FIGURA 2.23 – (a) Corpo-de-prova e (b) dispositivo para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Fonte: PLUVINAGE (1992).

O procedimento do ensaio é simples: nos cantos do corpo-de-prova são montados roletes de aço centrados nas superfícies internas do painel. Assim as peças cuneiformes, isto é, em forma de cunha, aplicam força aos roletes na direção das arestas da madeira, submetendo, desta maneira, a parte quadrada central do corpo-de-prova às tensões de cisalhamento. Os resultados obtidos pelo autor estão resumidos na tabela 2.3.

TABELA 2.3 – Resistências ao cisalhamento entre o corpo-de-prova painel e o corpo-de-prova da Norma Americana, NORRIS (1957).

Espécies (1)	Peça (2)	C.P. Painei		C. P. ASTM			Relação (8)
		Teor de umidade (%) (3)	Resist. ao cisalh. (MPa) (4)	Teor de umidade (%) (5)	Resist. ao cisalh. (MPa) (6)	Resist. ao cisalh. ajustada (MPa) (7)	
Douglas-fir	A	15,4	9,65	16,4	9,85	10,14	1,05
	B	16,1	6,48	16,4	6,91	6,97	1,07
	C	12,2	12,68	11,9	10,22	10,13	0,80
	D	11,3	7,45	11,6	8,18	8,25	1,11
	E	7,2	8,41	6,4	9,85	9,61	1,14
	F	7,3	6,41	6,5	8,63	8,42	1,31
Yellow-poplar	.....	17,4	6,60	18,5	6,62	6,84	1,04
Yellow birch	.....	13,0	12,34	15,5	13,17	14,16	1,15
Sweetgum	.....	16,6	12,33	18,5	10,51	11,11	0,90

Os valores da coluna (7) são os valores da coluna (6) ajustados para a umidade da coluna (3), através da expressão: $\tau_{(7)} = \tau_{(6)} + \tau_{(6)} \cdot [0,03 \cdot (U\%_{(5)} - U\%_{(3)})]$

A coluna (8) é obtida da relação entre a resistência ao cisalhamento ajustada para o corpo-de-prova da ASTM, coluna (7), e a resistência ao cisalhamento obtida do corpo-de-prova Painel, coluna (4).

Por fim, Norris concluiu que existe uma boa semelhança entre os valores de resistência obtidos entre os dois ensaios.

2.4.5– Estudo de BENDTSEN e PORTER (1978)

Bendtsen e Porter compararam resultados de resistências ao cisalhamento, entre um corpo-de-prova modificado com seção crítica de cisalhamento de dimensões 2”–1 1/2” (50,8 x 38,1mm) e o corpo-de-prova adotado pela Norma Americana ASTM D 143, com seção crítica de cisalhamento de 2”–2” (50,8 x 50,8mm). Avaliaram também a resistência ao cisalhamento em três planos: longitudinal-radial, longitudinal-tangencial e com os anéis de crescimento a 45 graus ao plano de cisalhamento.

Foi utilizada nos ensaios a madeira da espécie Southern pine com teor de umidade de 12%; os corpos-de-prova estão mostrados na figura 2.24.

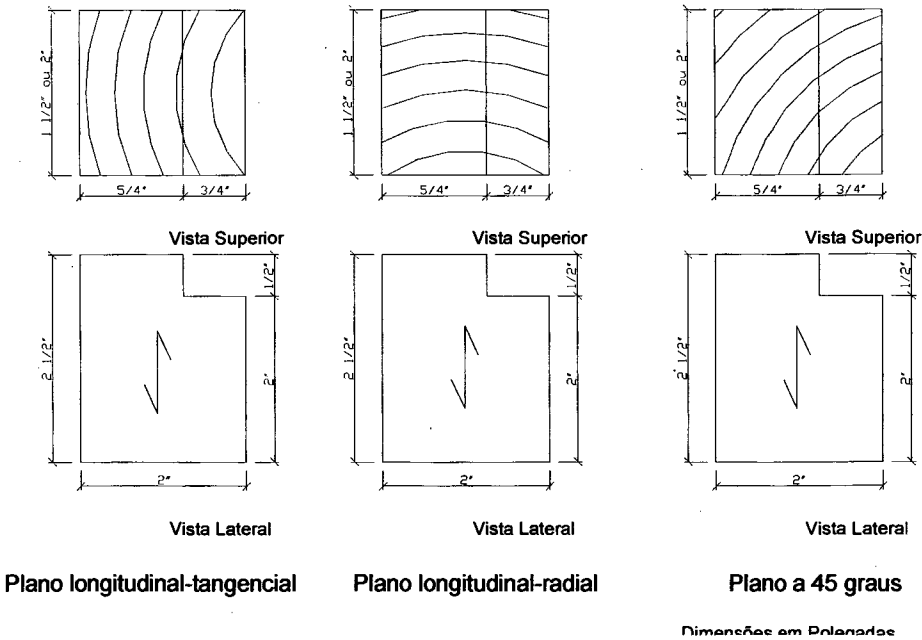


FIGURA 2.24– Geometria dos corpos-de-prova e orientação dos planos de cisalhamento. (1”≈ 25,4mm).

Na tabela 2.4 são apresentados os valores nos três planos, encontrados por Bendtsen e Porter para as resistências ao cisalhamento no corpo-de-prova modificado, de seção crítica de cisalhamento 2”- 1 1/2” e no corpo-de-prova da Norma Americana de seção crítica 2”- 2”.

TABELA 2.4– Resumo dos valores de resistência ao cisalhamento, BENDTSEN e PORTER (1978).

Plano de cisalhamento	2”-2”			2”-1 1/2”		
	U (%)	ρ (g/cm ³)	$\tau_{rupt.}$ (MPa)	U (%)	ρ (g/cm ³)	$\tau_{rupt.}$ (MPa)
Radial (90º aos anéis de crescimento)	12,6	0,439	9,00	12,6	0,446	9,21
Tangencial (0º aos anéis de crescimento)	12,9	0,444	8,56	12,7	0,447	8,53
45º aos anéis de crescimento	12,0	0,435	8,51	12,2	0,436	8,64

Os autores concluíram estatisticamente, através das resistências ao cisalhamento, que existe diferença significativa entre os três planos de cisalhamento: longitudinal-radial, longitudinal-tangencial e plano a 45º. De maior importância, segundo os próprios autores, foi que a análise estatística indicou que não havia diferença significativa nos valores das resistências ao cisalhamento entre os corpos-de-prova de 2-2” e 2”-1 1/2” em qualquer dos três planos de cisalhamento.

2.4.6 – Estudo de MENDES (1984)

Mendes apresentou um amplo estudo sobre a resistência da madeira ao cisalhamento. Comparou alguns modelos de ensaios de cisalhamento com o ensaio padrão do Método Brasileiro MB-26 de 1940, verificou a influência dos planos de cisalhamento na resistência da madeira e, por último, apresentou uma proposta para o ensaio de cisalhamento.

No primeiro experimento, comparou as resistências ao cisalhamento obtidas com o corpo-de-prova do MB-26/40, apresentado na figura 2.25, com os corpos-de-prova da figura 2.26. Na tabela 2.5 encontram-se resumidos estes resultados.

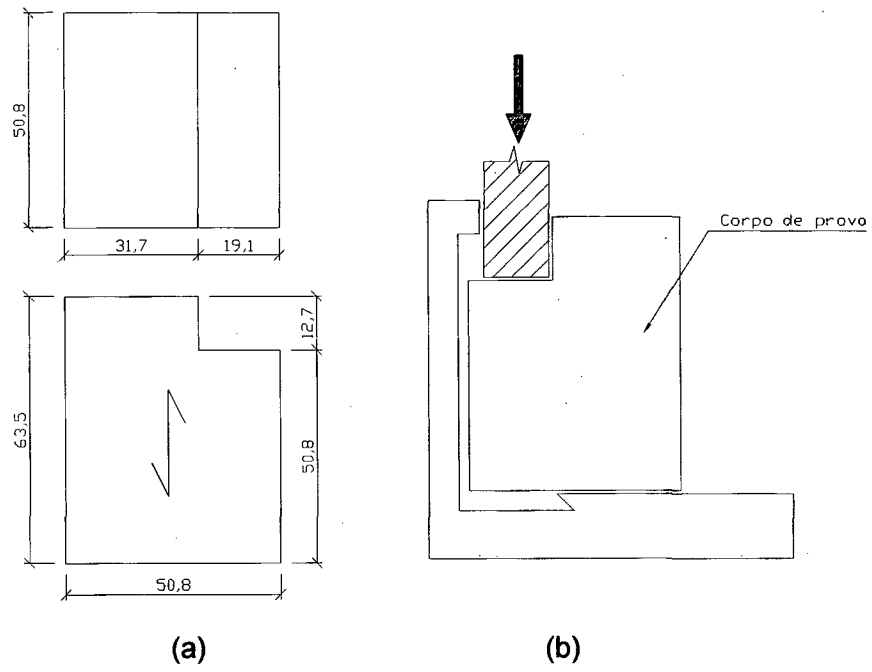


FIGURA 2.25 – Corpo-de-prova e detalhe do dispositivo de ensaio adotado pelo Método Brasileiro MB-26/40.

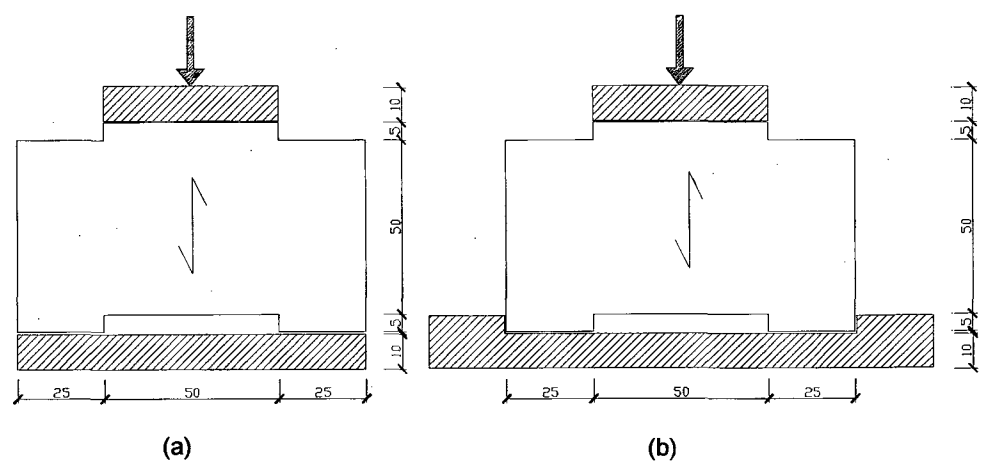


FIGURA 2.26 – Esquema de ensaio para cisalhamento em dois planos.

TABELA 2.5 – Resistências ao cisalhamento, para madeira seca ao ar de Pinho do Paraná.

Resistências médias de cisalhamento (MPa)		
Figura 2.26 (a)	Figura 2.26 (b)	Figura 2.25
8,48	8,49	10,36

Em outro ensaio realizado no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras LaMEM/USP, foram comparadas as resistências ao cisalhamento entre os corpos-de-prova das figuras 2.27 e 2.28 e o corpo-de-prova do MB-26/40, na figura 2.25. Na tabela 2.6 encontram-se resumidos estes resultados.

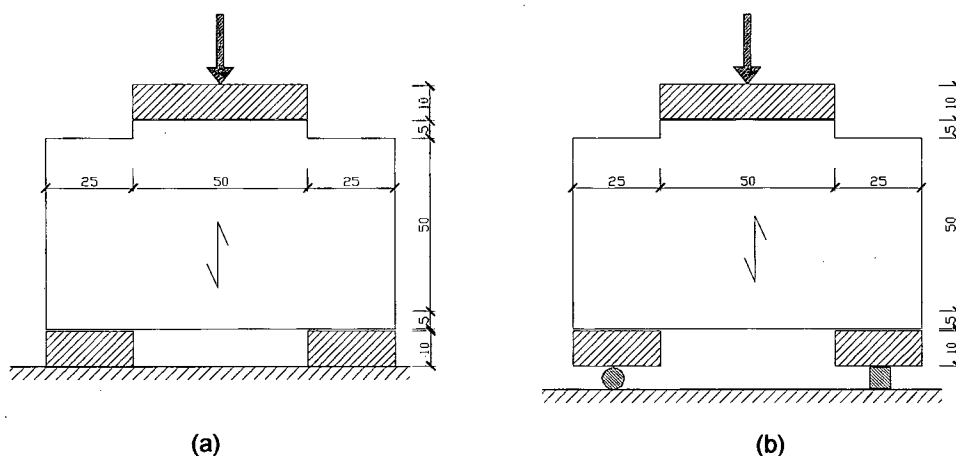


FIGURA 2.27 – Esquema de ensaio para cisalhamento em dois planos realizado no LaMEM/USP.

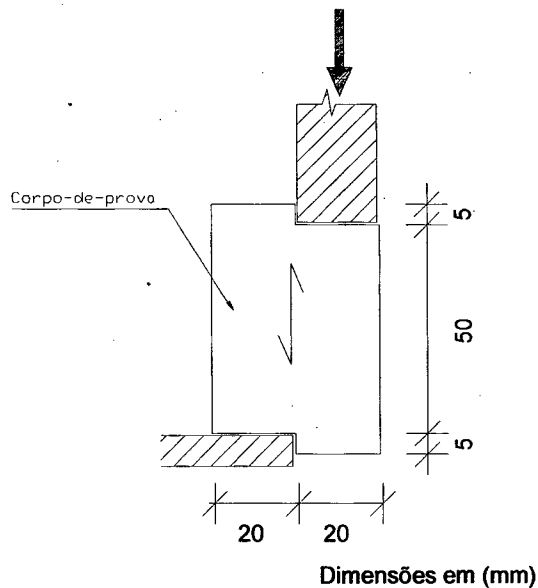


FIGURA 2.28 – Esquema de ensaio para cisalhamento em um plano.

TABELA 2.6 – Resistências ao cisalhamento para o Pinho do Paraná, para cada modelo de ensaio.

Barra	Ensaio	Madeira Seca ao Ar		Madeira Verde	
		Média das Tensões de Ruptura (MPa)	Teor de Umidade (%)	Média das Tensões de Ruptura (MPa)	Teor de Umidade (%)
01	Fig.2.27 (a)	5,53	12,57	3,18	54,27
	Fig. 2.27 (b)	2,25	12,42	1,73	56,27
	Fig. 2.28	9,61	11,30	4,67	52,26
	Fig. 2.25	9,83	12,19	5,10	47,83
02	Fig.2.27 (a)	6,14	12,54	2,85	45,10
	Fig. 2.27 (b)	2,47	12,46	1,84	37,40
	Fig. 2.28	9,58	12,05	4,54	40,50
	Fig. 2.25	9,31	12,27	4,22	51,65
03	Fig.2.27 (a)	10,24	12,59	5,98	41,25
	Fig. 2.27 (b)	4,40	11,76	3,08	42,25
	Fig. 2.28	15,74	11,90	8,19	34,10
	Fig. 2.25	15,28	11,55	8,00	39,95

As principais conclusões citadas por Mendes foram:

- 1) O corpo-de-prova da figura 2.27 (b) mostrou ruptura por tração normal às fibras, revelando-se, assim, existência de um binário no corpo-de-prova. Esta ruptura, apresentada na figura 2.29 (a), foi gerada pela quase inexistência de atrito nos apoios durante o carregamento.
- 2) Nos corpos-de-prova das figuras 2.26 e 2.27 (a), apoiados sobre placas metálicas, a ruptura ocorre por cisalhamento associado à tração normal. Esta ruptura, apresentada na figura 2.29 (b), foi gerada pelo aparecimento do atrito nos apoios durante o carregamento.

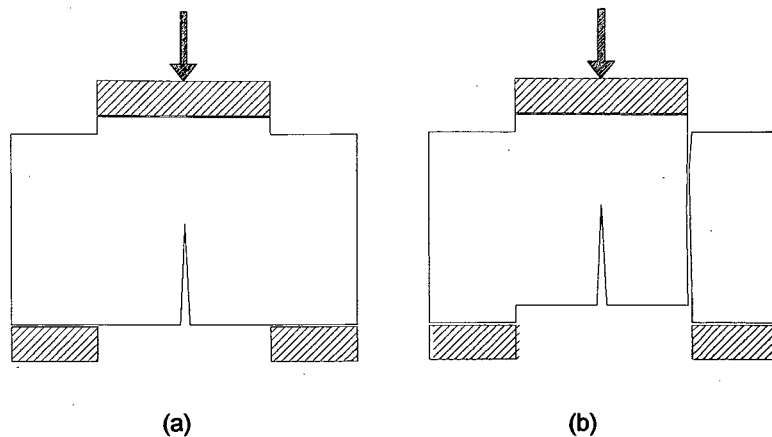


FIGURA 2.29 – (a) ruptura por tração normal às fibras da madeira; (b) ruptura por cisalhamento associada à tração normal às fibras da madeira.

- 3) Existe diferença significativa, com nível de significância de 5,0%, entre as resistências ao cisalhamento, obtidas no corpo-de-prova do MB-26/40, figura 2.25, e os corpos-de-prova da figura 2.26. Da mesma maneira, existe diferença nas resistências ao cisalhamento entre os quatro dispositivos de ensaios, presentes na tabela 2.6.

Mendes observou que as rupturas nos corpos-de-prova das figuras 2.26 e 2.27 estavam ocorrendo sistematicamente em apenas um lado, como mostra a figura 2.29 (b).

Possivelmente, estas rupturas em apenas um lado podem ter ocorrido em razão de alguma excentricidade, durante o ensaio, no processo de carga.

Houve interesse também em verificar a correlação entre as resistências ao cisalhamento nos planos longitudinal-radial e longitudinal-tangencial.

Assim, Mendes realizou ensaios seguindo-se o procedimento adotado pelo Método Brasileiro MB-26/40. A disposição dos planos de cisalhamento nos corpos-de-prova estão apresentados na figura 2.30 e os resultados encontram-se resumidos na tabela 2.7.

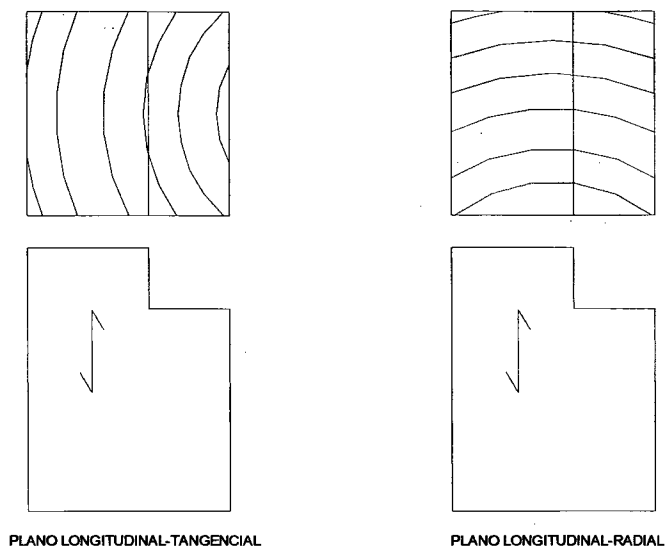


FIGURA 2.30 - Disposição dos planos de cisalhamento nos corpos-de-prova.

TABELA 2.7 – Média das resistência ao cisalhamento encontradas para as espécies de madeira nos dois planos de cisalhamento.

Espécie	Plano Longitudinal-radial			Plano Longitudinal-tangencial		
	U(%)	ρ (g/cm ³)	$\tau_{rupt.}$ (MPa)	U(%)	ρ (g/cm ³)	$\tau_{rupt.}$ (MPa)
Peroba Rosa	13,94	0,79	15,09	14,04	0,78	18,01
Jatobá	14,06	0,93	16,22	14,33	0,90	19,50
Cabriúva	11,62	0,86	18,96	11,88	0,84	23,52

Mendes concluiu que existe diferença significativa nos valores de resistência ao cisalhamento entre os planos longitudinal-radial e longitudinal-tangencial.

No final do seu trabalho, Mendes propôs um procedimento de ensaio, com um corpo-de-prova cúbico, figura 2.31. Este corpo-de-prova também é adotado pela Norma Alemã DIN 52 187/79.

Realizaram-se então ensaios comparando-se as resistências ao cisalhamento entre o dispositivo proposto e o adotado pelo Método Brasileiro MB-26/40. Os resultados encontram-se resumidos na tabela 2.8.

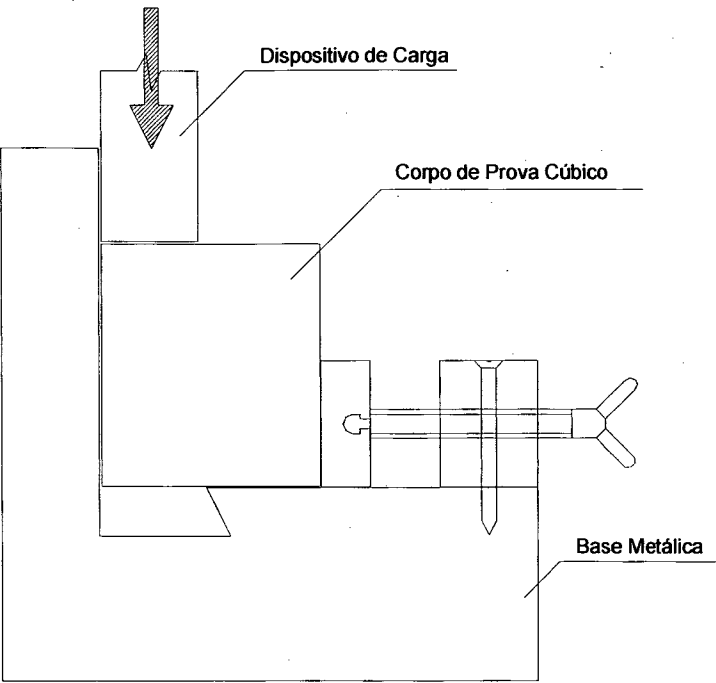


FIGURA 2.31– Dispositivo proposto por MENDES (1984) para o ensaio de cisalhamento.

TABELA 2.8 – Resistências ao cisalhamento, corrigidas para umidade de 12%, obtidas do ensaio proposto e MB-26/40.

Resistências ao cisalhamento (MPa)				
Barra	Peroba Rosa		Jatobá	
	Ensaio MB-26	Ensaio Proposto	Ensaio MB-26	Ensaio Proposto
01	16,75	18,24	18,14	20,31
02	13,88	14,72	17,90	19,83
03	15,93	18,03	18,05	20,46
04	13,79	15,55	16,54	19,34

As principais conclusões obtidas por Mendes são:

- 1) Existe diferença significativa, com nível de significância de 2,5%, entre os dois procedimentos de ensaio.
- 2) Os resultados mais elevados de resistência ao cisalhamento obtidos do corpo-de-prova proposto devem-se à eliminação dos esforços de tração normal.

Ora, possivelmente esta pressão aplicada lateralmente ao corpo-de-prova pode aumentar o atrito interno na madeira, aumentando assim a resistência ao cisalhamento.

2.4.7– Estudo de FERREIRA (1994)

Ferreira iniciou seu estudo a partir de uma viga maciça de Jatobá submetida à flexão. Ao estudar o modo de ruptura desta viga, realizou uma série de ensaios de cisalhamento, seguindo as recomendações do Método Brasileiro MB - 26/40.

Os resultados destes ensaios, segundo o próprio autor, não se apresentaram satisfatórios. De um total de 21 corpos-de-prova ensaiados, apenas 14% romperam por cisalhamento, 38% romperam na região do apoio e 48% romperam no plano de ruptura, com formação da fissura por flexão, ver figura 2.32.

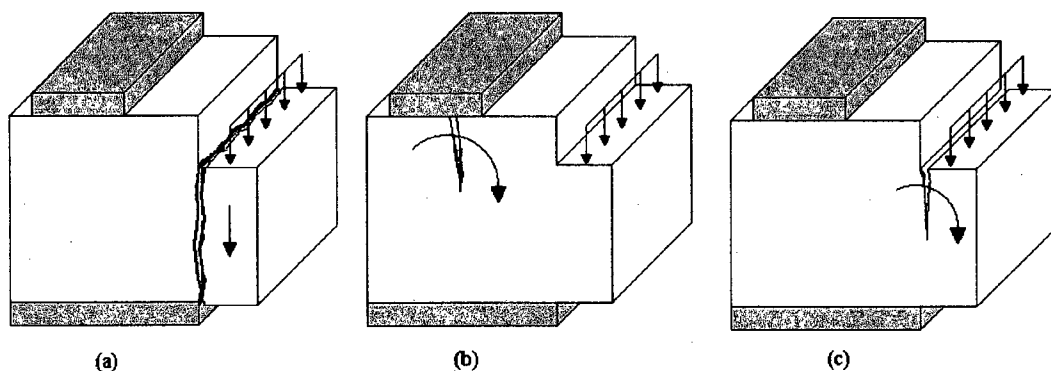


FIGURA 2.32 – Modo de ruptura dos corpos-de-prova (a) ruptura por cisalhamento; (b) ruptura na região do apoio e (c) ruptura ao longo da seção da seção de cisalhamento mas, com a abertura da fissura propagando-se de cima para baixo.

De posse destes resultados, e com objetivo de minimizar os problemas decorrentes do surgimento de tensões normais e, conseqüentemente, rupturas indesejadas, propôs-se o procedimento de ensaio apresentado na figura 2.33.

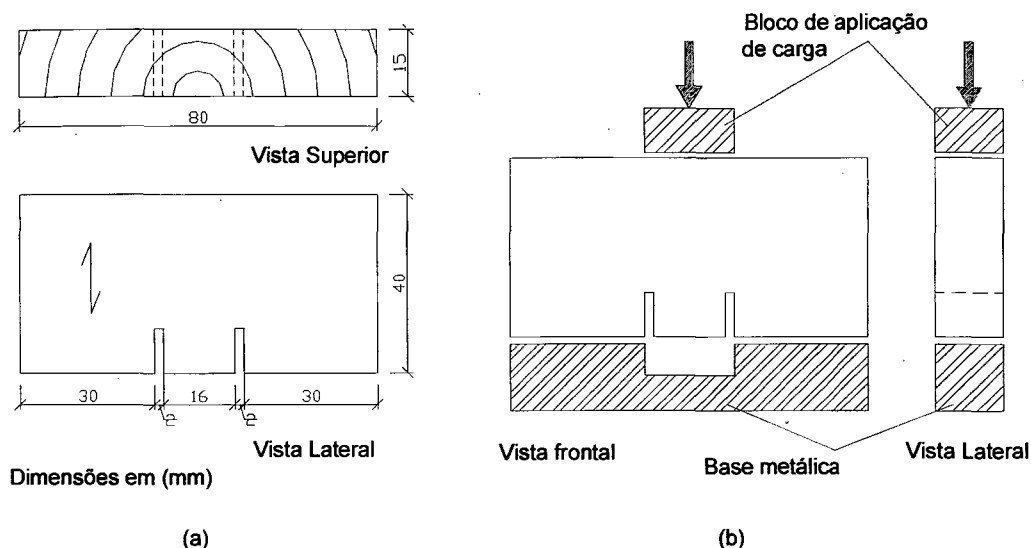


FIGURA 2.33 – (a) corpo-de-prova proposto por FERREIRA (1994) para ensaio; (b) arranjo do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

O autor realizou ensaios preliminares em corpos-de-prova de Ipê amarelo e Pinus. Observou que a ruptura se deu preferencialmente em uma das superfícies, considerando-se que a outra superfície estava em ruptura iminente. A figura 2.34 mostra o modo de ruptura no corpo-de-prova proposto por Ferreira.

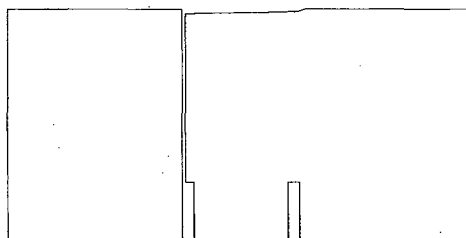


FIGURA 2.34 – Modo de ruptura dos corpos-de-prova propostos, FERREIRA (1994).

Ferreira também realizou ensaios com o corpo-de-prova proposto em madeira da espécie Jatobá. Os resultados encontrados para as resistências ao cisalhamento foram, segundo o autor, muito maiores que os obtidos com o corpo-de-prova do MB-26/40.

Ferreira concluiu que o ensaio normalizado poderia estar fornecendo valores menores, em virtude da excentricidade. Por outro lado, o ensaio proposto poderia estar fornecendo valores maiores que a resistência ao cisalhamento da madeira, pois neste corpo-de-prova, segundo o próprio autor, há o efeito de carga aplicada sobre uma área parcial, que leva à compressão transversal localizada, com perda da uniformidade de resistência ao longo do plano de cisalhamento.

O autor, então, sugeriu a utilização de um corpo-de-prova com quatro fendas, conforme indicado na figura 2.35.

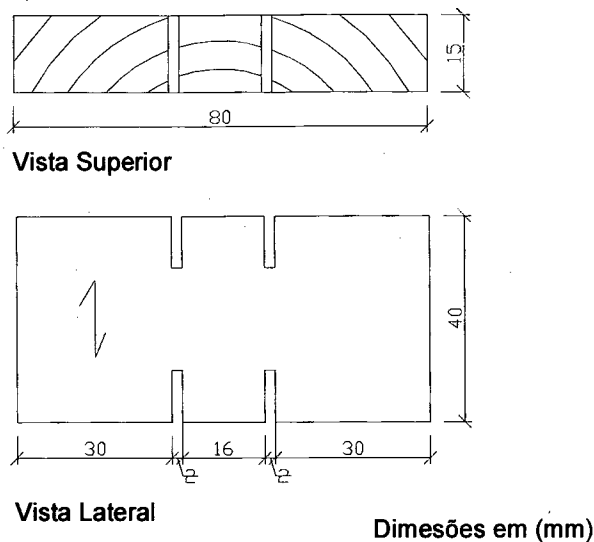


FIGURA 2.35 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira com quatro fendas.

Assim, a resistência média ao cisalhamento para o Jatobá, com corpos-de-prova de quatro fendas, foi 19,4% menor que a resistência média obtida para o ensaio com o corpo-de-prova de duas fendas.

Esta diferença pode ter acontecido, segundo Ferreira, em função da redução da carga aplicada em área parcial, ou ainda pelo fato dos corpos-de-prova terem sido tirados de outra peça de Jatobá.

Outro fato importante, levantado por Ferreira, foi o valor do coeficiente de variação de 35% para o corpo-de-prova do Método Brasileiro.

Segundo NANNI (1986), para uma amostra ser aceitável o valor do coeficiente de variação deve ser menor que 25%, caso contrário a qualidade dessa amostra pode ser considerada duvidosa. LAHR (1990) admite para valores de resistência de madeiras, no estado seco ao ar, a adoção de um coeficiente de variação igual 20%.

Ferreira observou que as rupturas nos corpos-de-prova propostos estavam ocorrendo preferencialmente em apenas um lado.

Estes corpos-de-prova, apresentados por Ferreira, possivelmente tendem a romper em presença de excentricidade. Pode-se citar, também, a questão das condições de apoio, mencionada em MENDES (1984), que constatou a ocorrência de flexão nos

corpos-de-prova. Portanto, é possível que a ruptura venha a ocorrer por tração normal às fibras, associada ao cisalhamento.

2.4.8– Estudo de LANG (1997)

Lang propôs para o ensaio de cisalhamento da madeira um corpo-de-prova que inicialmente foi usado para determinar a resistência das linhas de colagem, nos elementos de Madeira Laminada Colada. O autor realizou ensaios experimentais comparando os resultados obtidos com este modelo de corpo-de-prova, apresentado na figura 2.36, e o modelo padrão da Norma Americana ASTM D 143.

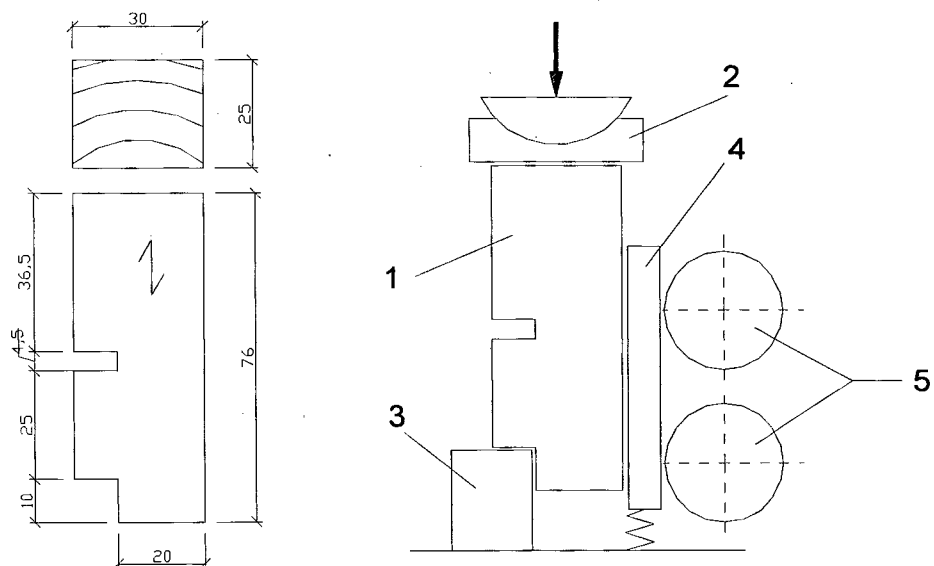


FIGURA 2.36 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira proposto por Lang.

O esquema de ensaio, figura 2.36, para o corpo-de-prova proposto (1), consiste de um bloco móvel para obter o cisalhamento (3), apoiado em uma placa de suporte fixa em uma mola (4), roletes de aço (5) e aplicador de carga rotulado (2).

Segundo Lang, as tensões normais às fibras presentes neste corpo-de-prova são menores que as tensões normais geradas no corpo-de-prova da Norma Americana.

Os resultados das resistências ao cisalhamento obtidos pelo método proposto foram, na média, 15% maiores que os valores obtidos pelo ensaio da ASTM, mostrando, segundo Lang, uma boa aproximação entre os dois métodos de ensaio.

Por outro lado, a variabilidade nos valores das resistências ao cisalhamento obtidas pelo método de ensaio proposto foi menor se comparada com os valores do ensaio da Norma Americana.

Lang concluiu que:

- As resistências ao cisalhamento obtidas pelo método proposto tiveram valores maiores que os da Norma Americana, sugerindo-se assim, que o método proposto diminui a magnitude dos distúrbios gerados pelas tensões normais no corpo-de-prova.

2.4.9– Estudo de HECK et al. (1998)

Heck et al. avaliaram a torção em corpos-de-prova de madeira como um método de ensaio para determinar a resistência ao cisalhamento. Através de estudos experimentais, compararam as diferenças entre as resistências ao cisalhamento obtidas entre o ensaio adotado pela Norma Americana ASTM D 143 e o ensaio de torção, figura 2.37.

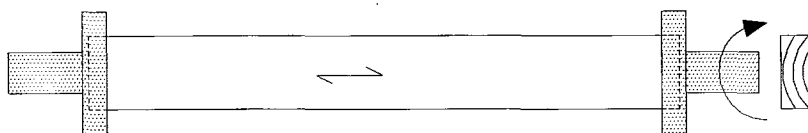


FIGURA 2.37 – Esquema para o ensaio de torção. Fonte: RIYANTO e GUPTA (1998).

Os ensaios realizados para madeira da espécie Douglas-fir, condicionada à umidade de 12%, permitiram aos autores chegarem aos seguintes comentários:

A média das resistências ao cisalhamento obtida pelo ensaio da torção é 35% maior que o valor obtido pelo ensaio da Norma Americana, publicado pelo WOOD HANDBOOK (1987), para a espécie de madeira ensaiada. Comparando-se a média das resistências encontradas entre os corpos-de-prova, confeccionados por Heck et al., para ambos os ensaios, esta diferença é de 21%.

Estas diferenças nas resistências ao cisalhamento podem ter ocorrido, segundo os próprios autores, em razão da diferença na densidade das madeiras: 0,45 para os valores publicados e 0,48 para a madeira utilizada no trabalho.

Por outro lado, RIYANTO e GUPTA (1998) também encontraram uma diferença de 37%, na resistência média ao cisalhamento entre o ensaio da torção e o da Norma Americana, publicado pelo WOOD HANDBOOK (1987).

Tomando-se por base estas constatações, HECK et al. (1998) sugerem que o corpo-de-prova, preconizado pela Norma Americana, pode estar minorando a resistência ao cisalhamento da madeira.

2.4.10– Estudo de MOREIRA e FASSONI (1998)

Moreira e Fassoni avaliaram por meio de análise numérica, através do Método dos Elementos Finitos, a distribuição de tensões que ocorre nos ensaios de cisalhamento da madeira seguindo-se as recomendações da Norma Brasileira NBR 7190/97.

Segundo Moreira e Fassoni neste ensaio a seção crítica de cisalhamento fica submetida a tensões de cisalhamento paralelas às fibras e, a tensões normais às fibras. Desta maneira, segundo os próprios autores, a ruptura do corpo-de-prova se dá em função da distribuição destas tensões, podendo ocorrer sob o efeito combinado de cisalhamento e tração normal.

Para visualizar estas distribuições de tensões os autores modelaram o corpo-de-prova da Norma Brasileira. Adotaram modelos com comportamento elástico-linear ortotrópico e isotrópico e análise bidimensional no plano longitudinal-radial. Nas análises foram utilizadas malhas de elementos quadriláteros Lagrangeanos, figura 2.38.

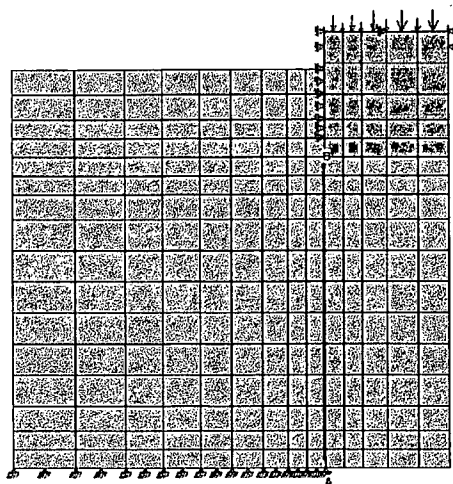


Figura 2.38 – Malha de elementos finitos para análise numérica. Fonte: MOREIRA e FASSONI (1998).

Através da análise numérica os autores concluíram que:

- A distribuição de tensões na seção crítica de cisalhamento não se dá de forma uniforme, ocorrendo concentrações de tensões na regiões extremas. Ocorre também a presença de tensões normais de tração ao longo da seção crítica.
- Ocorre no plano horizontal de carregamento concentrações de tensões na região adjacente à quina interna, em consequência da maior rigidez desta região em comparação com o trecho em balanço.

2.4.11– Outros métodos de ensaios para cisalhamento na madeira

KOLLMANN e CÔTÉ (1984) realizaram ensaios de cisalhamento seguindo vários métodos de ensaio. A seguir, nas figuras 2.39 e 2.40, são apresentados alguns corpos-de-prova ensaiados pelos autores.

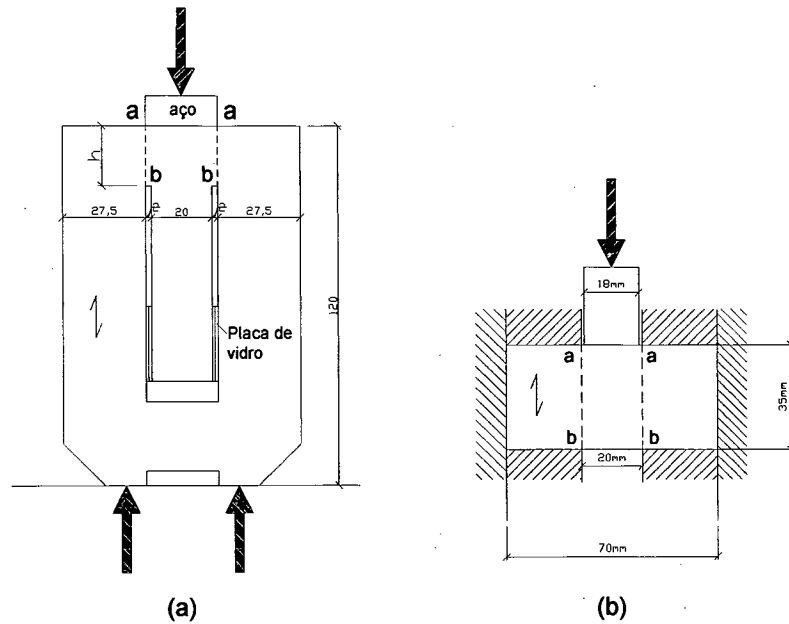


FIGURA 2.39 – Corpos-de-prova para ensaio de cisalhamento por compressão: (a) desenvolvido por GABER (1929); (b) desenvolvido por LANG.

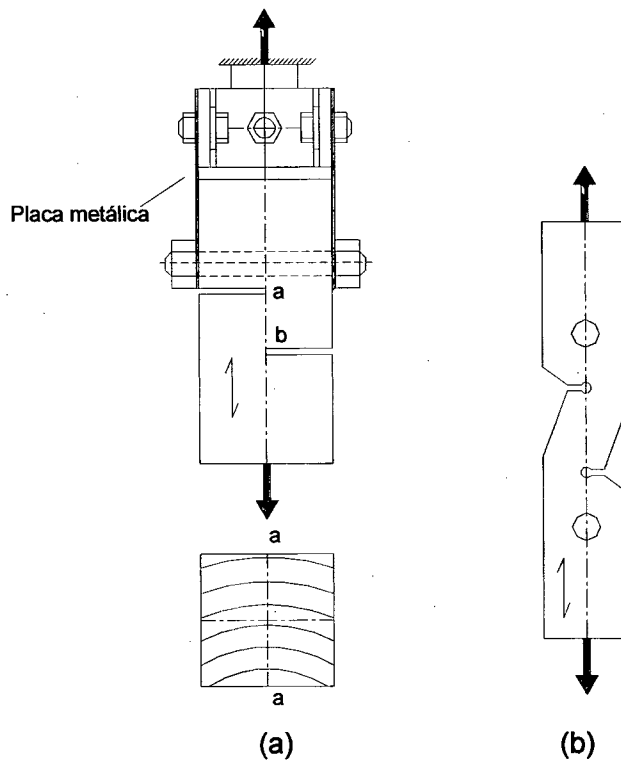


FIGURA 2.40 – Corpos-de-prova para ensaio de cisalhamento por tração: (a) primeira proposta de PETERMANN (1941); (b) segunda proposta de Petermann.

GUITARD (1987) apresenta o esquema de ensaio da figura 2.41, denominado pelo autor ensaio de cisalhamento do cubo único.

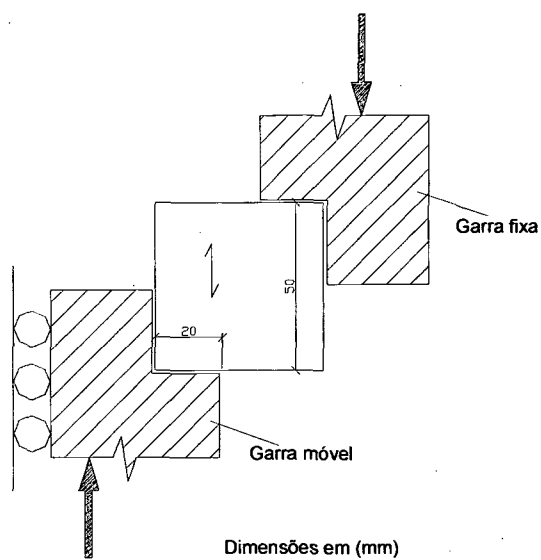


FIGURA 2.41 – Ensaio do cubo único. Dimensões do corpo-de-prova 50 x 50 x 50mm.

3- CORPO-DE-PROVA ESTUDADO

3.1- Introdução

Neste capítulo é apresentado o corpo-de-prova estudado nesta dissertação para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. Inicialmente é exposta a justificativa que motivou o autor a desenvolver este tema.

3.2- Justificativa

A Norma Brasileira para estruturas de madeira, recentemente, passou por uma grande reformulação.

A antiga Norma, NBR 7190 de 1982 (que é a mesma NB-11/1951) - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira, baseada no Método das Tensões Admissíveis passou, a exemplo de algumas normas internacionais, para o Método dos Estados Limites. Hoje, NBR 7190 de 1997 - Projeto de Estruturas de Madeira.

Do mesmo modo, a Norma para ensaios de caracterização física e mecânica da madeira sofreu atualizações. A primeira Norma, o MB-26 de 1940, foi modificada em 1980, passando a ser denominada NBR 6230 e, atualmente, encontra-se no anexo B da NBR 7190, versão 1997.

Assim, a atual Norma, além de fixar as condições gerais que devem ser seguidas no projeto e execução das estruturas, apresenta os métodos de ensaios para a determinação das propriedades da madeira.

Apesar dessas atualizações ao longo dos anos, na norma de madeira, pouco se alterou no que diz respeito ao método do ensaio de cisalhamento.

O ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira, prescrito pela atual Norma Brasileira, segue o modelo adotado pelo antigo MB-26/1940 que, possivelmente, baseou-se na Norma Americana.

Este modelo de ensaio de cisalhamento, adotado também pela maioria das normas internacionais, utiliza-se de forças opostas com alguma excentricidade, introduzindo além do esforço de cisalhamento, esforços adicionais para impedir a rotação do corpo-de-prova durante o ensaio.

Como constatado por alguns autores, na Revisão Bibliográfica, os resultados obtidos com este modelo de corpo-de-prova podem estar minorando a resistência ao cisalhamento da madeira, que pode ter valores maiores que os publicados.

Possivelmente, estas rupturas precoces podem estar atribuídas ao surgimento de outras tensões, além de cisalhamento, ao longo da seção crítica do corpo-de-prova.

Assim alguns pesquisadores, motivados pelo interesse de propor um ensaio de cisalhamento que apresente um corpo-de-prova menos sujeito à presença de tensões adicionais, apresentaram metodologias e corpos-de-prova das mais variadas formas.

No Brasil existem poucos estudos sobre alternativas de corpos-de-prova para ensaios de cisalhamento, embora os ensaios realizados sob as prescrições da Norma Brasileira apontam para problemas de rupturas indesejadas, em razão da presença de excentricidade no corpo-de-prova.

Como pôde ser visto na Revisão Bibliográfica, algumas propostas para o ensaio de cisalhamento também apresentaram, segundo seus próprios autores, problemas de rupturas indesejadas, seja em virtude da presença de excentricidade, durante a aplicação do carregamento ou em razão das condições de apoio.

É justificável, desta forma, a necessidade de propor à atual Norma Brasileira um novo modelo de corpo-de-prova para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

3.3- Modelo de Ensaio Estudado

O modelo de ensaio estudado fundamenta-se na obtenção da resistência ao cisalhamento através da aplicação de força de tração no corpo-de-prova.

As razões que levaram o autor a apresentar esta geometria de corpo-de-prova e procedimento de ensaio podem ser enumeradas da seguinte maneira:

- 1- Trata-se de um corpo-de-prova já usado no Laboratório de Experimentação em Estruturas – LEE, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC,

introduzido pelo Prof. Szücs e que vem sendo empregado nos últimos cinco anos;

- 2- minimiza o problema da presença de excentricidade, responsável pelas rupturas indesejadas;
- 3- elimina o problema do atrito nos apoios, responsável pela ruptura por flexão, em alguns corpos-de-prova;
- 4- é um corpo-de-prova de fácil confecção;

3.3.1- Geometria do corpo-de-prova

De um modo geral, a geometria do corpo-de-prova baseia-se no segundo modelo proposto por PETERMANN (1941) apud KOLLMANN e CÔTÉ (1984), apresentado no item 2.4.11, figura 2.40.

Porém, no modelo estudado nesta dissertação, é confeccionada mais uma seção crítica de cisalhamento, seguindo-se o detalhe do corpo-de-prova da Norma Francesa B 51-012, item 2.3.6.

O corpo-de-prova apresenta pequena espessura e no seu centro a área é reduzida através de três fendas, executadas para obter duas regiões que favoreçam o surgimento das tensões de cisalhamento. A presença de duas seções críticas tem como objetivo possibilitar a ruptura na região menos resistente uma vez que trata-se de um material não homogêneo e anisótropo.

Nas extremidades do corpo-de-prova e afastados da região de cisalhamento, são confeccionados furos circulares que tem a função de fixar o corpo-de-prova no dispositivo de ensaio. A geometria do corpo-de-prova pode ser vista na figura 3.1.

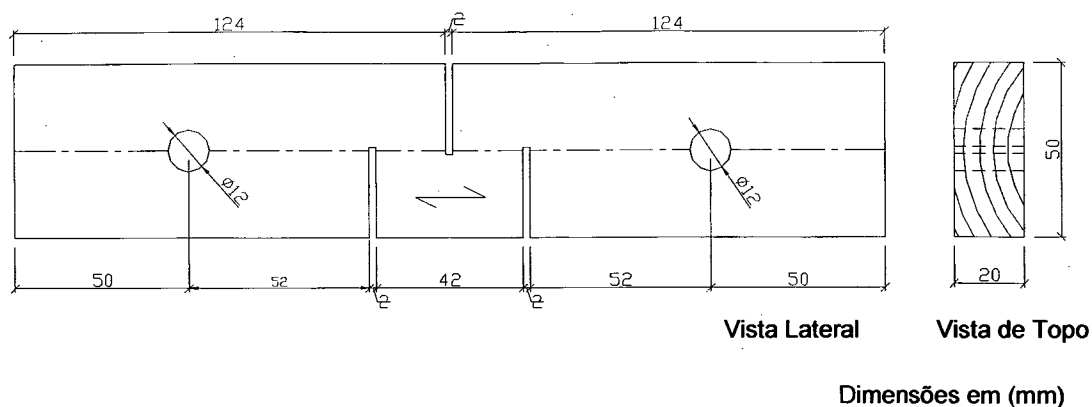


FIGURA 3.1 – Corpo-de-prova estudado, utilizado no LEE/UFSC para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

Para este trabalho de dissertação e considerando a evolução do corpo-de-prova utilizado no LEE, foram introduzidos furos nas extremidades das fendas para se obter arestas arredondadas na região das seções críticas de cisalhamento. O objetivo destes furos é diminuir as concentrações de tensões geradas na extremidade das fendas. Este corpo-de-prova é denominado corpo-de-prova estudado modificado, e pode ser visto na figura 3.2.

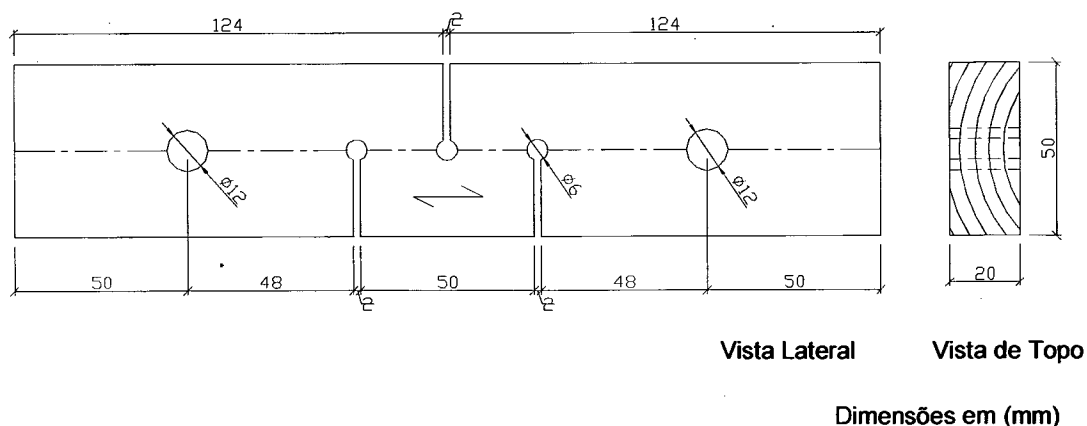


FIGURA 3.2 – Corpo-de-prova estudado modificado para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

3.3.2- Procedimento do ensaio

A disposição do ensaio segue o princípio que, separando-se o corpo-de-prova pelo equilíbrio das forças, obtém-se a seção que contribui para a resistência ao cisalhamento da madeira.

No início da aplicação do carregamento existem duas seções de dimensões nominais 20 x 20mm, sujeitas à tensão de cisalhamento. Porém, em função da atuação da carga que provocará a ruptura, ocorre a convergência das tensões para uma das seções, originando-se a ruptura do corpo-de-prova, figura 3.3.

Através das condições de equilíbrio, tem-se que a resultante da força cisalhante para ambas as seções críticas é igual à força aplicada de tração (F). Assim, dividindo esta força pela área da seção crítica (20x20 mm), obtém-se a resistência ao cisalhamento (τ), como mostrado na figura 3.3.

Embora submetida a mesma tensão de cisalhamento, a ruptura inicia e se propaga em apenas uma seção crítica, a mais fraca. Esta é uma vantagem de se considerar duas seções, pois para um material heterogêneo como a madeira, a resistência ao cisalhamento é mais representativa.

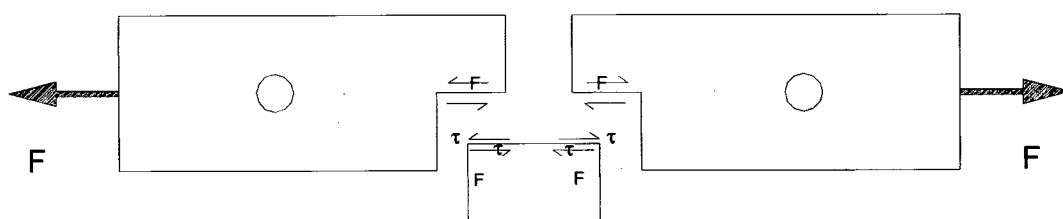


FIGURA 3.3 – Tensões de cisalhamento na seção crítica do corpo-de-prova.

O primeiro passo para a realização do ensaio é verificar as dimensões do corpo-de-prova. É necessário tomar três medidas: a espessura “e” e os comprimentos “A” e “B” das seções críticas, como ilustrado na figura 3.4. Após a ruptura do corpo-de-prova deve-se anotar, além da carga, qual a seção que contribuiu para a ocorrência desta.

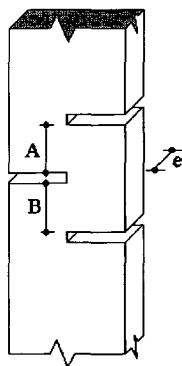


FIGURA 3.4 – Medidas tomadas no corpo-de-prova estudado para o cálculo da resistência ao cisalhamento.

4- ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1- Introdução

Neste capítulo são apresentadas as etapas desenvolvidas na fase experimental do trabalho. Os procedimentos da análise são detalhados, bem como a descrição dos materiais empregados e ensaios realizados.

Nos estudos de cisalhamento utilizando-se as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, foram ensaiados três modelos de corpos-de-prova: o Estudado, o Estudado modificado e o da Norma Brasileira NBR 7190/97. Em cada modelo confeccionaram-se corpos-de-prova nos planos de cisalhamento longitudinal-tangencial (LT) e longitudinal-radial (LR), no interesse de verificar uma possível diferença nas resistências ao cisalhamento entre os dois planos.

4.2- Seleção das Amostras

A seleção das amostras seguiu a metodologia descrita em LOGSDON (1998) de definir o estudo do comportamento através do indivíduo, ou seja, um corpo-de-prova. Por outro lado, o próprio autor explica que devido a natureza destrutiva dos ensaios de resistência, que impossibilita este procedimento, podem ser usados corpos-de-prova muito semelhantes.

LOGSDON (1998) entende por corpos-de-prova muito semelhantes aqueles, por exemplo, provenientes de uma mesma árvore pois, a variabilidade dos resultados é maior entre as espécies que entre as árvores de uma mesma espécie.

Assim, utilizando-se desta metodologia de ensaio e individualizando o estudo do comportamento com o uso de corpos-de-prova muito semelhantes, optou-se por estudar apenas uma árvore de cada espécie, com os corpos-de-prova retirados de uma mesma região: o cerne.

4.3- Aquisição da Madeira

Com o objetivo de abranger as duas categorias de madeiras foram selecionadas as seguintes espécies: o *Eucalyptus grandis* e o *Pinus elliottii*, representativo da madeira das dicotiledôneas e das coníferas, respectivamente.

O *Eucalyptus grandis* foi doado pela empresa Klabin Fabricadora de Papel e Celulose S.A., com sede no município de Telêmaco Borba no estado do Paraná, que forneceu seis toras com aproximadamente 270 cm de comprimento e 40 cm de diâmetro, cada uma.

O desdobro das toras foi realizado na própria serraria da empresa, orientado no sentido de obter barras de seção transversal de 6,0 cm x 8,0 cm, em posições que possibilitassem a retirada de corpos-de-prova para o ensaio de cisalhamento com as direções principais bem definidas.

A seguir no LEE/UFSC, por meio de uma classificação visual, foi escolhida uma tora cujas respectivas barras apresentassem o menor número de nós e melhor orientação dos anéis de crescimento.

O *Pinus elliottii* foi obtido em uma serraria na região de Florianópolis. Foram adquiridas duas toras com aproximadamente 315 cm de comprimento e 35 cm de diâmetro. O desdobro da tora foi realizado na própria serraria e orientado de maneira análoga à do *Eucalyptus grandis*. Da mesma maneira, por meio de uma classificação visual das barras, foi escolhida uma tora cujas respectivas barras apresentassem o menor número de nós e a melhor orientação dos anéis de crescimento.

A figura 4.1 mostra a posição de retirada das barras na tora e o detalhe da posição dos anéis de crescimento. As posições diametralmente simétricas também foram utilizadas.

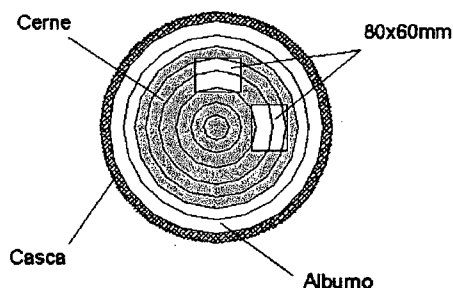


FIGURA 4.1 – Posição de retirada das barras na tora de madeira e posição dos anéis de crescimento.

4.4- Corpos-de-prova Necessários

A Norma Brasileira NBR 7190/97 estabelece que os corpos-de-prova para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira devem ser confeccionados com suas direções principais bem definidas.

Nesta dissertação será também analisada, nos corpos-de-prova, a resistência ao cisalhamento nos planos longitudinal-tangencial e longitudinal-radial. Portanto serão necessárias para cada espécie em estudo, no mínimo duas barras com as direções principais bem definidas, para retirar os corpo-de-prova de cisalhamento.

O comprimento das barras limita a quantidade de corpos-de-prova que devem ser semelhantes e isentos de defeitos, de acordo com a metodologia apresentada no item 4.2. Para que os corpos-de-prova pudessem ser confeccionados a partir do comprimento das barras adquiridas, resolveu-se adotar as quantidades de corpos-de-prova apresentadas na tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Quantidade de corpos-de-prova e ensaios a serem realizados.

Tipo de Ensaio / Plano de Cisalhamento / Modelo do Corpo-de-prova	Número de corpos-de-prova		Total
	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus elliottii</i>	
Cisalhamento / L-R / NBR 7190	12	12	24
Cisalhamento / L-T / NBR 7190	12	12	24
Cisalhamento / L-R / Estudado	12	12	24
Cisalhamento / L-T / Estudado	12	12	24
Cisalhamento / L-R / Estudado modificado	12	12	24
Cisalhamento / L-T / Estudado modificado	12	12	24
Compressão paralela às fibras	6	6	12
TOTAL	78	78	156

A Norma preconiza a caracterização simplificada para as propriedades de madeiras de espécie usuais. Esta caracterização é realizada a partir de ensaios de compressão paralela às fibras. Logo serão realizados também ensaios de compressão paralela às fibras da madeira.

4.5- Determinação do Teor de Umidade da Madeira

Para as espécies de madeiras estudadas, o teor de umidade do lote foi determinado por dois métodos distintos. O primeiro, através de um método não normalizado, foi realizado por meio de um equipamento de ultra-som existente no LEE, e especialmente desenvolvido para madeiras: o Sylvatest, de origem Suíça. O objetivo principal desta obtenção do teor de umidade foi de verificar a convergência dos valores encontrados com os valores obtidos mediante um ensaio normalizado.

Por outro lado, o segundo método é o preconizado pela Norma Brasileira NBR 7190/97. Os objetivos da determinação do teor de umidade por este método são: além de servir como referência para verificar a convergência dos valores obtidos pelo Sylvatest, também, servir como referência para o controle de secagem dos corpos-de-prova por estufa. Este último objetivo será explicado detalhadamente no item 4.6.

4.5.1- Por meio da utilização do Sylvatest

O uso da técnica do ultra-som, na Engenharia Civil, iniciou na Europa nos anos 50. Inicialmente foi usada nas pesquisas em concreto, vindo a seguir, alguns estudos teóricos para sua aplicação na madeira. Porém os primeiros estudos experimentais foram realizados na Alemanha em 1983, SANDOZ (1989).

Segundo BUCUR (1996) a utilização da acústica na madeira é a maior ferramenta entre as diferentes técnicas não destrutivas para a caracterização do comportamento mecânico da madeira e seus compósitos.

A técnica de avaliação não destrutiva é considerada como a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de um material sem alterar sua capacidade de uso, ROSS et al. (1998).

De um modo geral, esta técnica aplica os princípios da Física e Mecânica dos Sólidos para obter os valores das propriedades dos materiais. Segundo BUCUR (1996), a técnica do ultra-som baseia-se na velocidade de propagação de um pulso ultra-sônico, de baixa frequência, nos materiais sólidos.

A propagação deste pulso ultra-sônico está relacionada com a vibração da microestrutura da madeira e, fundamentalmente, nas propriedades elásticas do eixo de propagação, BUCUR (1995) apud SANDOZ (1996).

A principal vantagem do ultra-som é a flexibilidade na realização das medições de velocidade, relacionadas com o tempo de propagação e o comprimento da amostra, BUCUR (1996).

Um dos equipamentos de ultra-som desenvolvidos especialmente para o emprego em madeiras é o Sylvatest. Este equipamento consiste de uma caixa com teclado para entrada de dados, um mostrador alfanumérico e três cabos de leitura. Dois destes cabos possuem transdutores, um com a finalidade de gerar e outro receber a onda transmitida, figura 4.2. O terceiro cabo serve para a conexão de uma sonda com duas agulhas e uma pastilha para a verificação do teor de umidade da madeira e sua temperatura.

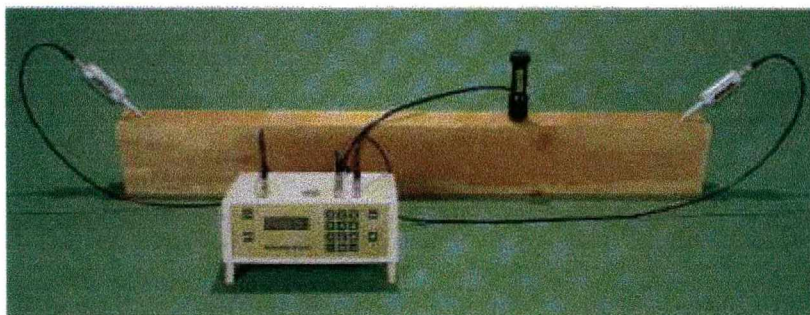


FIGURA 4.2 – Equipamento Sylvatest de ultra-som.

Neste trabalho o interesse foi de apenas avaliar a convergência das leituras de umidade obtidas com o Sylvatest com os valores de umidade obtidos por métodos normalizados. A seguir são apresentados os procedimentos seguidos nesta etapa.

As leituras de umidade foram realizadas na mesma face da barra, ao longo do seu eixo longitudinal. Foram feitas três leituras em cada barra, totalizando doze leituras de umidade para cada espécie de madeira, sendo que uma leitura foi realizada no meio da barra e as outras duas uma em cada extremidade. Como limite para a leitura nas extremidades, seguiu-se a recomendação do SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (1991), de deixar uma distância mínima de 20 cm. Na figura 4.3 é apresentada a realização de uma destas leituras.

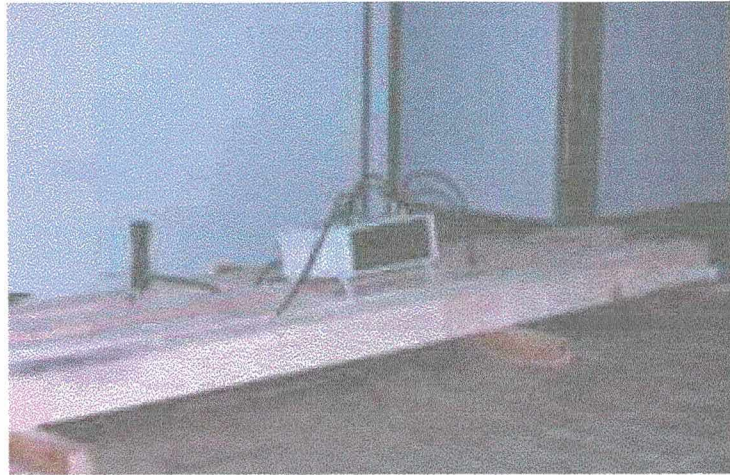


FIGURA 4.3 – Utilização do Sylvatest para a determinação do teor de umidade em uma barra de *Eucalyptus grandis*.

Os resultados dos ensaios para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* encontram-se no Anexo A. Na tabela 4.2, item 4.5.3, encontra-se o resumo estatístico deste valores.

4.5.2- Por meio da Norma Brasileira NBR 7190/97

A extração dos corpos-de-prova e o procedimento de ensaio seguem as recomendações da Norma Brasileira.

Para obter um resultado representativo do lote foram extraídos de cada espécie de madeira três corpos-de-prova, retirados ao longo de cada barra.

Foram utilizados para a determinação do teor de umidade, uma balança analítica com precisão de 0,01g e uma estufa com sensibilidade de 1°C e variação de 0 à 300°C.

Os resultados dos ensaios para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* encontram-se no Anexo A. Na tabela 4.2, item 4.5.3, encontra-se o resumo estatístico deste valores.

4.5.3- Análise comparativa entre os valores de umidade

A análise estatística básica para os valores de $U\%_{\text{Sylvatest}}$ e $U\%_{\text{NBR}}$ entre as duas espécies de madeira está apresentada na tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Resumo da análise estatística básica dos teores de umidade para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* para os dois ensaios.

Parâmetros	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	Sylvatest	NBR 7190/97	Sylvatest	NBR 7190/97
N (unidades)	12	12	12	12
\bar{x} (%)	85,83	81,85	95,70	88,65
Sd (%)	11,81	8,69	12,08	9,18
c.v. (%)	13,76	10,66	12,62	10,32
Maior (%)	115,70	99,49	114,04	108,6
Menor (%)	74,80	71,01	80,96	74,8

(*) a leitura com o Sylvatest para o *Eucalyptus grandis* apresentou um valor espúrio ($U\%_{\text{Sylvatest}}=115,70\%$), constituindo-se em um valor extremo em relação à média da umidade, 85,83%, sendo excluído ao se fazer as demais análises. As leituras seguintes não apresentaram valores espúrios.

Sendo:

N = número de elementos para cada ensaio;

\bar{x} = média dos n elementos;

Sd = desvio padrão dos n elementos;

c.v. = coeficiente de variação;

maior = máximo valor encontrado;

menor = mínimo valor encontrado.

Tomando-se por base os valores obtidos para o teor de umidade com o Sylvatest ($U\%_{\text{Sylvatest}}$) e o calculado pela NBR 7190/97 ($U\%_{\text{NBR}}$), fez-se a comparação com o objetivo de verificar a possível existência ou não de uma diferença significativa entre as médias desses valores para as duas madeiras utilizadas no trabalho.

A análise estatística foi feita utilizando-se a metodologia descrita em NANNI (1986) que consiste de dois testes.

O primeiro teste é uma análise de duas variâncias que apontará o procedimento a ser adotado para o segundo teste. Este último, uma prova de hipótese com respeito de duas médias que indicará a existência ou não de diferença significativa entre os valores de $U\%_{\text{Sylvatest}}$ e $U\%_{\text{NBR}}$, para o caso das madeiras estudadas.

Para uma melhor compreensão desses testes, será feita uma apresentação, de forma resumida, a fim de deixar transparente o critério adotado para se chegar às conclusões do trabalho.

Para comparar duas variâncias, deve-se usar a distribuição de “F”, supondo que as distribuições são normais e independentes, formula-se a hipótese a comprovar:

$$H_0: \sigma_x = \sigma_y \quad \text{com hipótese alternativa de:}$$

$$H_1: \sigma_x \neq \sigma_y$$

Supondo que σ_x e σ_y provém de duas populações normais, isto é, que existem duas variáveis aleatórias X e Y , tais que $X \rightarrow N(\mu_x, \sigma_x)$, $Y \rightarrow N(\mu_y, \sigma_y)$, decide-se tomar a amostra de cada população, de tamanhos n_x e n_y , respectivamente, as quais fornecerão os valores de \bar{x} , \bar{y} , s_x e s_y .

Fixando um nível de significância, aqui adotado 95%, determina-se $F_\alpha(n_x - 1, n_y - 1)$, em seguida calcula-se “F” definido por:

$$F = \frac{s_x^2}{s_y^2}$$

onde s_x^2 é sempre o maior desvio padrão entre as amostras. A hipótese H_0 é rejeitada se $F > F_\alpha(n_x - 1, n_y - 1)$.

Para a prova de hipóteses com respeito a duas médias, o procedimento é:

Supondo que $X \rightarrow N(\mu_x, \sigma_x)$, $Y \rightarrow N(\mu_y, \sigma_y)$, são variáveis independentes, a hipótese a testar é:

$$H_0: \mu_x = \mu_y \quad \text{com hipótese alternativa de:}$$

$$H_1: \mu_x \neq \mu_y$$

Como n_x e n_y (número de corpos de prova) são pequenos, temos duas possibilidades: $\sigma_x = \sigma_y$ e $\sigma_x \neq \sigma_y$. Se no teste “F” a hipótese H_0 não é rejeitada, tem-se:

$$\sigma_w = \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}$$

Como σ não é conhecido, usa-se a média ponderada de s_x^2 e s_y^2 , definida por:

$$s_p^2 = \frac{(n_x - 1) \cdot s_x^2 + (n_y - 1) \cdot s_y^2}{n_x + n_y - 2}$$

E a hipótese $\mu_x = \mu_y$ é rejeitada se:

$$|t| = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{s_p \cdot \sqrt{1/n_x + 1/n_y}} > t_{\alpha/2}(n_x + n_y - 2)$$

Para o desenvolvimento deste teste adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste F: duas amostras para variâncias. Os resultados encontram-se nas tabelas 4.3 e 4.4 para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, respectivamente.

TABELA 4.3 – Teste F: duas amostras para variâncias; para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (U% _{NBR})	Variável 2 (U% _{Sylvest})
Média	81,85	83,11
Variância	75,59	56,13
Observações	12	11
Gl	11	10
F	1,35	
P(F<=f) uni-caudal	0,32	
F crítico uni-caudal	2,94	

Logo: Como $F < F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que U%_{Sylvest} e U%_{NBR} são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe diferença significativa entre o U%_{Sylvest} e U%_{NBR}, com 95% de confiabilidade.

TABELA 4.4 – Teste F: duas amostras para variâncias; para a madeira de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 (U% _{NBR})	Variável 2 (U% _{Sylvatest})
Média	88,65	95,70
Variância	84,32	145,87
Observações	12	12
Gl	11	11
F	0,58	
P(F<=f) uni-caudal	0,19	
F crítico uni-caudal	0,35	

Logo: Como $F > F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que U%_{Sylvatest} e U%_{NBR} são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre os teores de umidade U%_{Sylvatest} e U%_{NBR}, com 95% de confiabilidade.

A prova de hipótese com respeito de duas médias é feita com base na distribuição t , quando o desvio padrão da população não é conhecido.

Para o desenvolvimento deste teste adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste t : duas amostras presumindo variâncias equivalentes para o caso da madeira de *Eucalyptus grandis* e duas amostras presumindo variâncias diferentes para o caso da madeira de *Pinus elliottii*. Os resultados encontram-se nas tabelas 4.5 e 4.6 para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, respectivamente.

TABELA 4.5 – Teste t : duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (U% _{NBR})	Variável 2 (U% _{Sylvatest})
Média	81,85	83,11
Variância	75,59	56,13
Observações	12	11
Variância agrupada	66,33	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	21	
Stat t	0,37	
P(T<=t) uni-caudal	0,36	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,72	
t crítico bi-caudal	2,08	

Logo: Como $t < t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias sejam iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que não

existe diferença significativa entre as médias dos $U\%_{\text{Sylvatest}}$ e $U\%_{\text{NBR}}$, para a madeira de *Eucalyptus grandis* estudada.

TABELA 4.6 – Teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes; para a madeira de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 ($U\%_{\text{NBR}}$)	Variável 2 ($U\%_{\text{Sylvatest}}$)
Média	88,65	95,70
Variância	84,32	145,87
Observações	12	12
Variância agrupada	115,09	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	21	
Stat t	1,61	
$P(T \leq t)$ uni-caudal	0,06	
t crítico uni-caudal	1,72	
$P(T \leq t)$ bi-caudal	0,12	
t crítico bi-caudal	2,08	

Logo: Como $t < t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias sejam iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que não existe diferença significativa entre as médias dos $U\%_{\text{Sylvatest}}$ e $U\%_{\text{NBR}}$, para a madeira de *Pinus elliottii* estudada.

Os resultados apresentados nas tabelas 4.5 e 4.6 permitem chegar a seguinte conclusão:

- a um nível de confiabilidade de 95% não existe diferença significativa para os teores de umidade, entre os valores obtidos pelo ensaio da Norma Brasileira e as leituras no Sylvatest, para as espécies de madeiras estudadas (*Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*), nesses intervalos de umidade obtidos.

4.6- Controle do Teor de Umidade Por Meio da Secagem em Estufa

Como visto na tabela 4.2 as médias para os teores de umidade, obtidas por meio do ensaio da Norma Brasileira NBR 7190/97, para o *Eucalyptus grandis* e o *Pinus elliottii* foram 81,85% e 88,65%, respectivamente.

Porém, a mesma Norma estabelece que: “... Na caracterização usual das propriedades de resistência e rigidez de um dado lote de material, os resultados de ensaios realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo entre 10% e 20%, devem ser apresentados com os valores corrigidos para a umidade padrão de 12%”.

Em virtude desta exigência da Norma optou-se em realizar a secagem da madeira em estufa, pois a secagem da madeira ao ar livre nas condições de laboratório, para este intervalo de umidade, necessitaria de um período em torno de três a quatro meses.

Portanto, foi necessário reduzir a umidade de ambas as espécies de madeiras para o intervalo entre 10% e 20%. O procedimento adotado está descrito a seguir.

Após a determinação da umidade dos lotes de madeira deu-se início à fase de confecção dos corpos-de-prova. Nesta primeira fase os corpos-de-prova foram “pré-confeccionados”, isto é, apenas serrados em seu contorno. Não foram realizados entalhes, furos ou fendas, de acordo com os modelos finais que os regerão.

Foi admitido por hipótese como teor de umidade inicial de todos os corpos-de-prova, para ambas as espécie, os valores determinados pelas prescrições da NBR 7190/97, ou seja, 81,85% para o *Eucalyptus grandis* e 88,65% para o *Pinus elliottii*, uma vez que as condições de estocagem das barras eram, teoricamente, as mesmas e principalmente pelo fato de se originarem da mesma tora.

Conhecida a massa inicial de cada corpo-de-prova foi possível estimar sua massa seca, por meio da equação (4.1), e a massa que deveria atingir a um determinado teor de umidade, equação (4.2).

$$U\%_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \cdot 100 \Rightarrow m_0 = \frac{m_i}{\left(1 + \frac{U\%_i}{100}\right)} \quad (4.1)$$

$$U\% = \frac{m_{U\%} - m_0}{m_0} \cdot 100 \Rightarrow m_{U\%} = m_0 \cdot \left(1 + \frac{U\%}{100}\right) \Rightarrow m_{U\%} = m_i \cdot \frac{\left(1 + \frac{U\%}{100}\right)}{\left(1 + \frac{U\%_i}{100}\right)} \quad (4.2)$$

Sendo:

$U\%_i \rightarrow$ teor de umidade inicial do corpo-de-prova, adotado por espécie como sendo a umidade média dos corpos-de-prova ensaiados, em %;

$U\% \rightarrow$ teor de umidade, que se pretende ensaiar o corpo-de-prova, em %;

$m_o \rightarrow$ estimativa da massa seca do corpo-de-prova, com a hipótese de que $U\%_i$ seja a umidade inicial do corpo-de-prova;

$m_i \rightarrow$ massa inicial do corpo-de-prova, com a hipótese de ter o teor de umidade $U\%_i$;

$m_{U\%} \rightarrow$ estimativa da massa do corpo-de-prova, quando seu teor de umidade for $U\%$.

Imaginou-se que como havia sido adotado um valor médio para determinar a umidade do lote arbitrou-se, para todos os corpos-de-prova de ambas as espécies de madeira, um valor $U\%=15\%$ em razão deste ser o valor médio do intervalo de 10% e 20%.

A seguir os corpos-de-prova, ainda “pré-confeccionados”, foram colocados em uma estufa de esterilização e secagem a um nível de umidade de 35°C por dois dias. A cada dois dias o nível de temperatura era elevado em 5°C. O controle da massa nos corpos-de-prova era realizado diariamente e sempre que um corpo-de-prova atingisse a massa pré determinada de interesse era retirado da estufa.

Durante o processo de secagem do *Pinus elliottii*, alguns corpos-de-prova destinados à confecção do modelo da NBR 7190/97 sofreram problemas, possivelmente atribuídos à secagem muito rápida. Como havia um controle diário das condições de temperatura e massa dos corpos-de-prova, imaginou-se que houve algum problema na secagem durante a noite. Assim, completou-se os corpos-de-prova da NBR 7190/97 com uma barra da outra tora de *Pinus elliottii*.

Terminada esta etapa os corpos-de-prova foram definitivamente confeccionados, estando prontos para serem ensaiados.

4.7- Ensaios de Compressão Paralela às Fibras da Madeira

A Norma Brasileira permite a caracterização simplificada das resistências da madeira de espécies conhecidas a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras.

O corpo-de-prova e o método de ensaio utilizados neste trabalho são os descritos no item B.8 da Norma Brasileira NBR 7190/97.

Para este ensaio foram utilizados um paquímetro digital e uma máquina para ensaios Losenhusemwerk com capacidade de carga para 300kN. O paquímetro, para conferir as dimensões do corpo-de-prova, possuía precisão de centésimos de milímetro. A resistência à compressão deve ser determinada com carregamento monotônico crescente e controle de velocidade para ensaio de 10MPa/minuto. Na tabela 4.7 encontram-se resumidos os valores obtidos do ensaio.

TABELA 4.7– Classe de resistência das madeiras selecionadas na condição padrão de referência U=12%.

Espécie	n (unidades)	$f_{c0,m}$ (MPa)	$f_{c0,k}$ (MPa)	Classe de Resistência	
				Coníferas	Dicotiledôneas
<i>Eucalyptus grandis</i>	6	65,6	69,9		C60
<i>Pinus elliottii</i>	6	43,4	44,1	C30	

Sendo:

n = número de corpos-de-prova ensaiados;

$f_{c0,m}$ = resistência média à compressão paralela às fibras;

$f_{c0,k}$ = resistência característica à compressão paralela às fibras.

4.8- Ensaios de Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira

Os esforços que originam o deslizamento de um plano em relação a outro são chamados de cisalhamento e, no caso das madeiras, ocorrem segundo planos paralelos às camadas de crescimento.

Estas tensões de cisalhamento sempre aparecem em pares para manter o equilíbrio, razão esta que, segundo FERREIRA (1994), torna-se muito difícil produzir experimentalmente somente tensões de cisalhamento.

A resistência ao cisalhamento pode ser definida como o valor médio de tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo-de-prova prismático, sendo:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}} \quad (4.3)$$

Onde:

$F_{v0,máx}$ = máxima força cisalhante aplicada ao corpo-de-prova;

A_{v0} = área da seção crítica do corpo-de-prova, num plano paralelo às fibras.

Nesta dissertação foram realizados ensaios de cisalhamento nos três modelos de corpos-de-prova e nos dois planos de cisalhamento. Quanto à nomenclatura dos corpos-de-prova, adotou-se uma metodologia própria, conforme apresentado na figura 4.4. No Anexo B encontram-se os resultados obtidos dos ensaios experimentais, nos quais todos os corpos-de-prova aparecem indicados com sua nomenclatura.

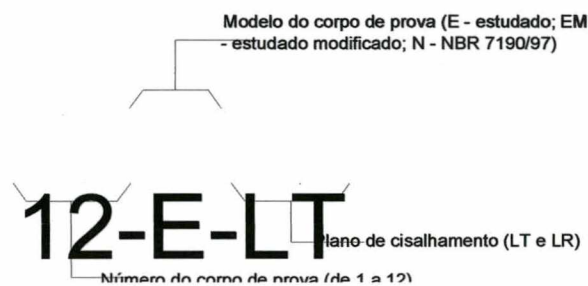


FIGURA 4.4 – Sistema de nomenclatura dos corpos-de-prova.

Encerrados os ensaios de cisalhamento, foram realizados ensaios de umidade e densidade aparente, seguindo-se as prescrições da NBR 7190/97, com corpos-de-prova extraídos dos próprios corpos-de-prova de cisalhamento. Este procedimento foi adotado para se obter o teor de umidade de cada corpo-de-prova ensaiado.

Assim os valores das resistências ao cisalhamento com diferentes teores de umidade foram corrigidos para a umidade padrão de 12%, por meio da expressão (4.4), apresentada pela NBR 7190/97.

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (4.4)$$

Os valores da densidade aparente com diferentes teores de umidade foram corrigidos para o teor de umidade padrão de 12%, por meio das expressões (4.5) e (4.6), apresentadas em LOGSDON (1998).

$$\rho_{12} = \rho_{U\%} + \rho_{U\%} \cdot \left[(1 - \delta_V) \cdot \frac{(12 - U\%)}{100} \right] \quad (4.5)$$

onde:

$$\delta_V = \frac{\Delta V}{U\%} \quad \text{e} \quad \Delta V = \frac{V_{U\%} - V_{\text{seca}}}{V_{\text{seca}}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

sendo:

ρ_{12} = densidade aparente ajustada a umidade padrão de 12%;

$\rho_{U\%}$ = densidade aparente na umidade U%;

U% = teor de umidade da madeira, no instante do ensaio;

δ_V = coeficiente de retratibilidade volumétrica;

ΔV = retração volumétrica, para a variação de umidade entre U% e 0%;

$V_{U\%}$ = volume de corpo-de-prova para o teor de umidade U%;

V_{seca} = volume do corpo-de-prova para a madeira seca, U=0%.

4.8.1- Corpo-de-prova estudado

Para este ensaio foram utilizados um paquímetro digital e uma máquina para ensaios Losenhusemwerk com capacidade de carga para 300kN. O paquímetro, para conferir as dimensões do corpo-de-prova, possuía precisão de centésimos de milímetro. A aplicação da carga se deu por meio de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga e controle da velocidade de carregamento prevista para este ensaio de 2,5MPa/minuto.

Também foi utilizado um dispositivo desenvolvido no LEE/UFSC, no qual por meio de um esforço inicial de compressão aplicado na sua parte superior, produz-se o deslocamento vertical, originando um esforço de tração na sua base inferior. O corpo-de-prova é fixado ao dispositivo por intermédio de pinos metálicos que atravessam sua seção transversal nos furos circulares, localizados próximo às extremidades.

Na figura 4.5 é apresentado o dispositivo de ensaio. A geometria do corpo-de-prova já foi apresentada anteriormente no item 3.3.1, Capítulo 3.

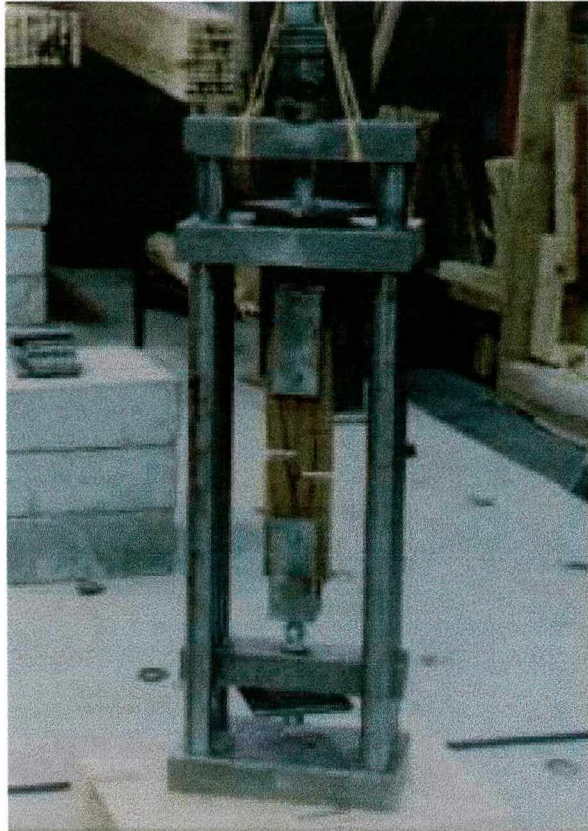


FIGURA 4.5 – Dispositivo para ensaio de cisalhamento adotado no LEE/UFSC.

No Anexo B encontram-se, para cada corpo-de-prova, os valores da resistência ao cisalhamento, densidade aparente e teor de umidade.

O resultado da análise estatística básica dos valores das resistências ao cisalhamento, corrigidas à umidade de 12%, para o corpo-de-prova estudado nos dois planos de cisalhamento para o *Eucalyptus grandis* e o *Pinus elliottii*, encontra-se na tabela 4.8.

TABELA 4.8 – Resumo estatístico das resistências ao cisalhamento para o corpo-de-prova estudado.

Parâmetros	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	Plano de Cisalhamento		Plano de Cisalhamento	
	Longitudinal-tangencial	Longitudinal-radial	Longitudinal-tangencial	Longitudinal-radial
N (unidades)	12	12	12	12
\bar{x} (MPa)	8,29	7,05	6,81	5,74
Sd (MPa)	0,82	0,79	0,84	0,81
c.v. (%)	9,89	11,21	12,33	14,11
Maior (MPa)	9,64	8,52	8,35	7,09
Menor (MPa)	6,96	5,61	5,65	4,56

(*) Não foram encontrados valores espúrios.

Nas figuras 4.6 e 4.7 estão apresentadas as rupturas típicas observadas para o corpo-de-prova estudado das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, respectivamente.

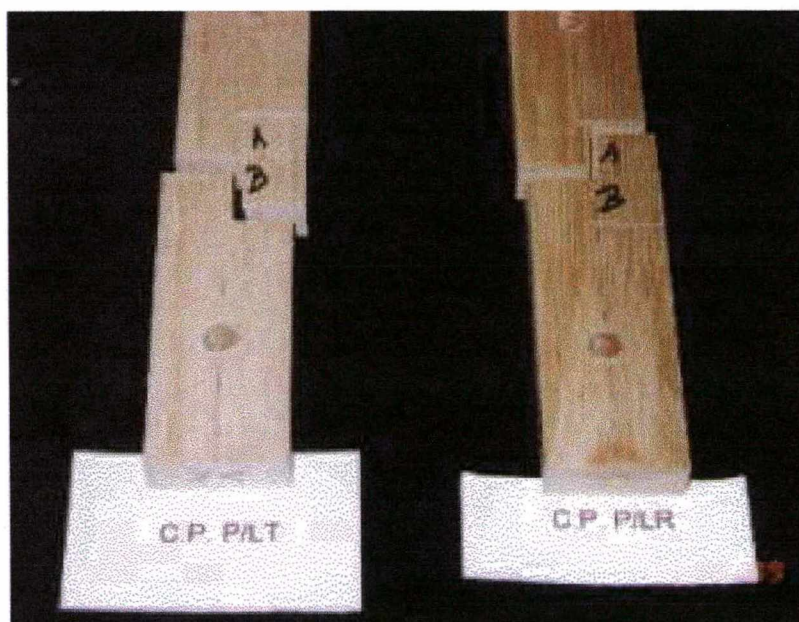


FIGURA 4.6 – Ruptura típica para o corpo-de-prova estudado da madeira de *Eucalyptus grandis* nos planos LT e LR.

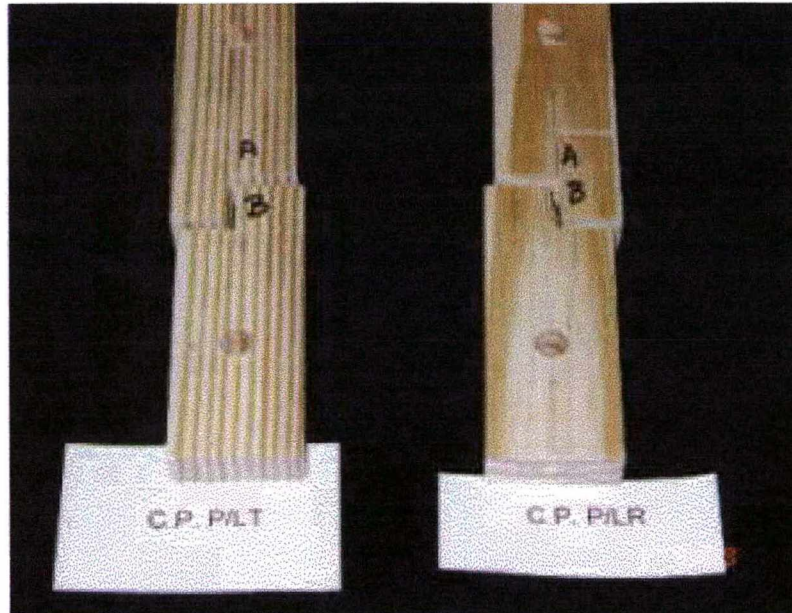


FIGURA 4.7 – Ruptura típica para o corpo-de-prova estudado da madeira de *Pinus elliottii* nos planos LT e LR.

4.8.2- Corpo-de-prova estudado modificado

Os equipamentos utilizados neste ensaio são os mesmos descritos no item 4.8.1. A geometria do corpo-de-prova já foi apresentada anteriormente no item 3.3.1, Capítulo 3.

No Anexo B encontram-se, para cada corpo-de-prova, os valores da resistência ao cisalhamento, densidade aparente e teor de umidade.

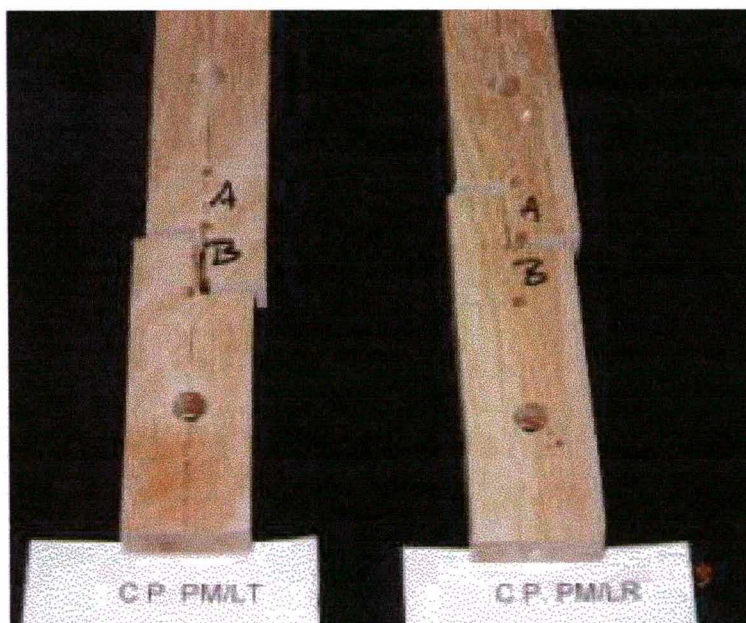
O resultado da análise estatística básica dos valores das resistências ao cisalhamento, corrigidas à umidade de 12%, para o corpo-de-prova estudado modificado nos dois planos de cisalhamento para o *Eucalyptus grandis* e o *Pinus elliottii* encontra-se na tabela 4.9.

TABELA 4.9 – Resumo estatístico das resistências ao cisalhamento para o corpo-de-prova estudado modificado.

Parâmetros	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	Plano de Cisalhamento		Plano de Cisalhamento	
	Longitudinal-tangencial	Longitudinal-radial	Longitudinal-tangencial	Longitudinal-radial
N (unidades)	12	12	12	12
\bar{x} (MPa)	8,13	7,08	6,45	5,56
Sd (MPa)	0,93	0,93	0,71	0,77
c.v. (%)	11,44	13,14	11,01	13,85
Maior (MPa)	9,34	8,64	7,67	7,00
Menor (MPa)	6,33	5,60	5,36	4,32

(*) Não foram encontrados valores espúrios.

Nas figuras 4.8 e 4.9 estão apresentadas as rupturas típicas observadas para o corpo-de-prova estudado modificado das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, respectivamente.

FIGURA 4.8 – Ruptura típica para o corpo-de-prova estudado modificado da madeira de *Eucalyptus grandis* nos planos LT e LR.

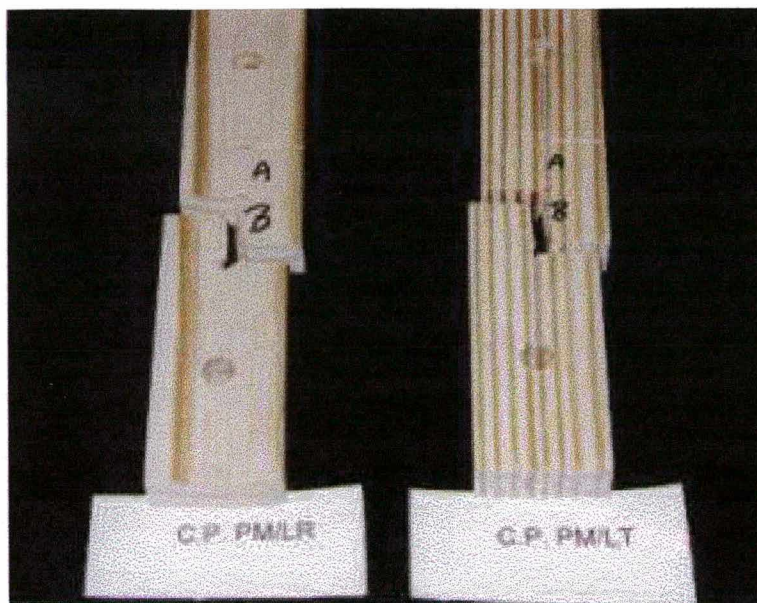


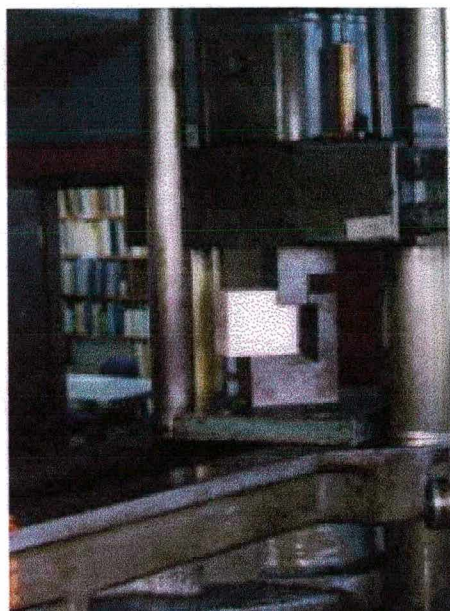
FIGURA 4.9 – Ruptura típica para o corpo-de-prova estudado modificado da madeira de *Pinus elliottii* nos planos LT e LR.

4.8.3- Corpo-de-prova da Norma Brasileira NBR 7190/97

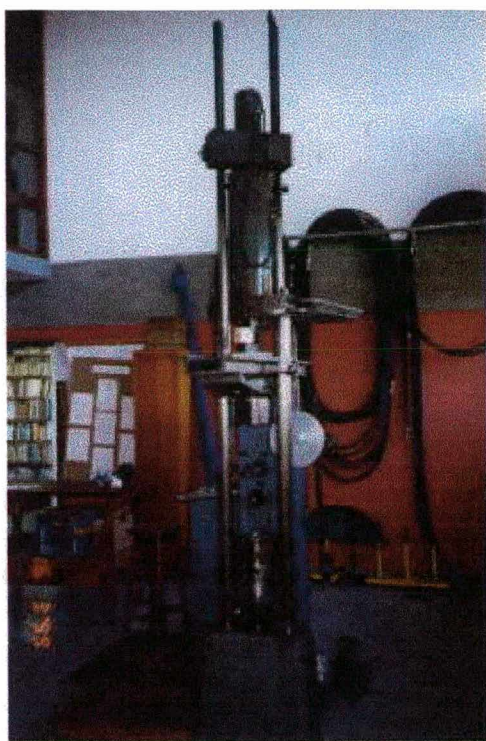
Pelo fato de que no LEE não se disponha do aparato de ensaio para cisalhamento preconizado pela Norma Brasileira, optou-se em realizar estes ensaios no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira – LaMEM da Universidade de São Paulo/São Carlos.

Para este ensaio foram utilizados um paquímetro digital e uma máquina universal. O paquímetro, para conferir as dimensões do corpo-de-prova possuía precisão de centésimos de milímetro. A máquina universal de ensaios tinha capacidade de carga para 250kN e permitia o controle da velocidade de carregamento prevista para este ensaio de 2,5MPa/minuto.

Na figura 4.10 podem ser observadas a máquina universal e a instalação do corpo-de-prova no dispositivo de ensaio. A geometria do corpo-de-prova já foi apresentada anteriormente no item 2.3.1, Capítulo 2.



(a)



(b)

FIGURA 4.10 – (a) Instalação do corpo-de-prova; (b) Máquina universal de ensaios.

No Anexo B encontram-se, para cada corpo-de-prova, os valores da resistência ao cisalhamento, densidade aparente e teor de umidade.

O resultado da análise estatística básica dos valores das resistências ao cisalhamento, corrigidas à umidade de 12%, para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 nos dois planos de cisalhamento para o *Eucalyptus grandis* e o *Pinus elliottii* encontra-se na tabela 4.10.

TABELA 4.10 – Resumo estatístico das resistências ao cisalhamento para o corpo-de-prova da NBR 7190/97.

Parâmetros	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Pinus elliottii</i>	
	Plano de Cisalhamento		Plano de Cisalhamento	
	Longitudinal-tangencial	Longitudinal-radial	Longitudinal-tangencial	Longitudinal-radial
N (unidades)	12	12	12	12
\bar{x} (MPa)	7,12	6,25	5,48	5,18
Sd (MPa)	1,08	0,92	1,11	0,84
c.v. (%)	15,17	14,72	20,26	16,22
Maior (MPa)	9,15	7,47	7,38	6,67
Menor (MPa)	5,29	4,32	4,17	3,78

(*) Não foram encontrados valores espúrios.

Nas figuras 4.11 e 4.12 estão apresentadas as rupturas típicas observadas para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, respectivamente.



FIGURA 4.11 – Ruptura típica para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 da madeira de *Eucalyptus grandis* nos plano LT e LR.

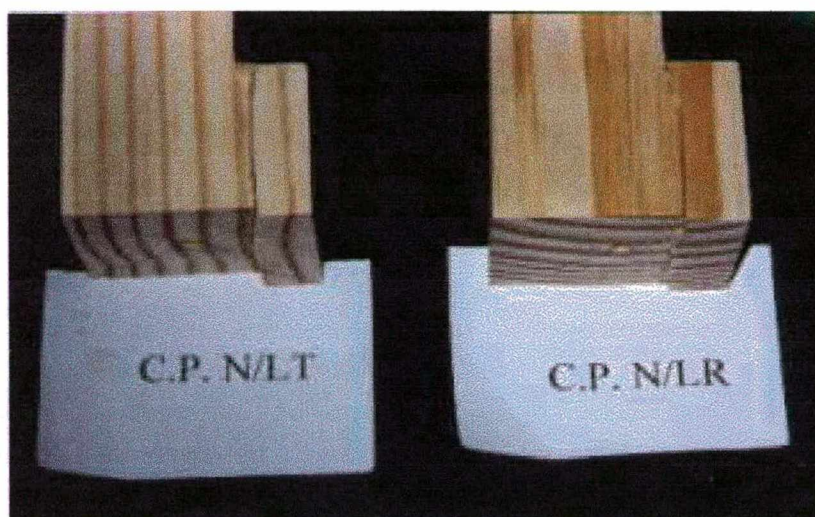


FIGURA 4.12 – Ruptura típica para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 da madeira de *Pinus elliottii* nos plano LT e LR.

4.9- Análise Comparativa entre os Planos de Cisalhamento Longitudinal-tangencial e Longitudinal-radial

Tomando-se por base os valores das resistências ao cisalhamento corrigidos à umidade de 12%, deseja-se verificar se as médias destes valores entre os dois planos de cisalhamento (longitudinal-tangencial e longitudinal-radial) são estatisticamente equivalentes.

A comparação é feita empregando-se a análise estatística descrita em NANNI (1986), já comentada no item 4.5.3.

Em primeiro é apresentada a análise para os três modelos de corpo-de-prova de *Eucalyptus grandis* e, a seguir, a madeira de *Pinus elliottii*.

4.9.1- Análise para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*

4.9.1.1- Corpo-de-prova estudado

Para o desenvolvimento deste teste adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste F: duas amostras para variâncias. O resultado encontra-se na tabela 4.11.

TABELA 4.11 – Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	8,29	7,05
Variância	0,67	0,63
Observações	12	12
Gl	11	11
F	1,07	
P(F<=f) uni-caudal	0,46	
F crítico uni-caudal	2,82	

Logo: Como $F < F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que τ_{LT} e τ_{LR} são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado, com 95% de confiabilidade.

Para o desenvolvimento deste teste adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes. O resultado encontra-se na tabela 4.12.

TABELA 4.12 – Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova estudado de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	8,29	7,05
Variância	0,67	0,63
Observações	12	12
Variância agrupada	0,65	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	22	
Stat t	3,76	
P(T<=t) uni-caudal	0,00	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,00	
t crítico bi-caudal	2,07	

Logo: Como $t > t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado.

4.9.1.2- Corpo-de-prova estudado modificado

Para este desenvolvimento adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste F: duas amostras para variâncias. O resultado encontra-se na tabela 4.13.

TABELA 4.13 – Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado modificado de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	8,13	7,08
Variância	0,87	0,87
Observações	12	12
Gl	11	11
F	1,00	
P(F<=f) uni-caudal	0,50	
F crítico uni-caudal	0,35	

Logo: Como $F > F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que τ_{LT} e τ_{LR} são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado modificado, com 95% de confiabilidade.

Adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes. O resultado encontra-se na tabela 4.14.

TABELA 4.14 – Teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes; para o corpo-de-prova estudado modificado de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	8,13	7,08
Variância	0,87	0,87
Observações	12	12
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	22	
Stat t	2,76	
P(T<=t) uni-caudal	0,01	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,01	
t crítico bi-caudal	2,07	

Logo: Como $t > t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado modificado.

4.9.1.3- Corpo-de-prova da Norma Brasileira NBR 7190/97

Para este desenvolvimento adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste F: duas amostras para variâncias. O resultado encontra-se na tabela 4.15.

TABELA 4.15 – Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	7,12	6,25
Variância	1,18	0,84
Observações	12	12
Gl	11	11
F	1,39	
P(F<=f) uni-caudal	0,30	
F crítico uni-caudal	2,82	

Logo: Como $F < F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que τ_{LT} e τ_{LR} são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova da NBR 7190/97, com 95% de confiabilidade.

Adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes. O resultado encontra-se na tabela 4.16.

TABELA 4.16 – Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de *Eucalyptus grandis*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	7,12	6,25
Variância	1,18	0,84
Observações	12	12
Variância agrupada	1,01	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	22	
Stat t	2,12	
P(T<=t) uni-caudal	0,02	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,05	
t crítico bi-caudal	2,07	

Logo: Como $t > t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova da NBR 7190/97.

4.9.2- Análise para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii*

A análise estatística para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii* é feita de modo análogo às análises descritas no item 4.9.1.

4.9.2.1- Corpo-de-prova estudado

Para este desenvolvimento adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste F: duas amostras para variâncias. O resultado encontra-se na tabela 4.17.

TABELA 4.17 – Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	6,81	5,74
Variância	0,70	0,66
Observações	12	12
Gl	11	11
F	1,06	
P(F<=f) uni-caudal	0,46	
F crítico uni-caudal	2,82	

Logo: Como $F < F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que τ_{LT} e τ_{LR} são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado, com 95% de confiabilidade.

Adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes. O resultado encontra-se na tabela 4.18.

TABELA 4.18 – Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova estudado de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	6,81	5,74
Variância	0,70	0,66
Observações	12	12
Variância agrupada	0,68	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	22	
Stat t	3,18	
P(T<=t) uni-caudal	0,00	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,00	
t crítico bi-caudal	2,07	

Logo: Como $t > t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado.

4.9.2.2- Corpo-de-prova estudado modificado

Para este desenvolvimento adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste F: duas amostras para variâncias. O resultado encontra-se na tabela 4.19.

TABELA 4.19 – Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova estudado modificado de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	6,45	5,56
Variância	0,50	0,60
Observações	12	12
gl	11	11
F	0,84	
P(F<=f) uni-caudal	0,39	
F crítico uni-caudal	0,35	

Logo: Como $F > F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que τ_{LT} e τ_{LR} são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado modificado, com 95% de confiabilidade.

Adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes. O resultado encontra-se na tabela 4.20.

TABELA 4.20 – Teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes; para o corpo-de-prova estudado modificado de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	6,45	5,56
Variância	0,50	0,60
Observações	12	12
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	22	
Stat t	2,93	
P(T<=t) uni-caudal	0,00	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,01	
t crítico bi-caudal	2,07	

Logo: Como $t > t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova estudado modificado.

4.9.2.3- Corpo-de-prova da Norma Brasileira NBR 7190/97

Para este desenvolvimento adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste F: duas amostras para variâncias. O resultado encontra-se na tabela 4.21.

TABELA 4.21 – Teste F: duas amostras para variâncias; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	5,48	5,18
Variância	1,24	0,70
Observações	12	12
gl	11	11
F	1,77	
P(F<=f) uni-caudal	0,18	
F crítico uni-caudal	2,82	

Logo: Como $F < F_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese de que τ_{LT} e τ_{LR} são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova da NBR 7190/97, com 95% de confiabilidade.

Adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97, teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes. O resultado encontra-se na tabela 4.22.

TABELA 4.22 – Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes; para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 de *Pinus elliottii*.

	Variável 1 (Plano LT)	Variável 2 (Plano LR)
Média	5,48	5,18
Variância	1,24	0,70
Observações	12	12
Variância agrupada	0,97	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	22	
Stat t	0,73	
P(T<=t) uni-caudal	0,24	
t crítico uni-caudal	1,72	
P(T<=t) bi-caudal	0,47	
t crítico bi-caudal	2,07	

Logo: Como $t < t_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que não existe diferença significativa entre τ_{LT} e τ_{LR} para o corpo-de-prova da NBR 7190/97.

4.10- Comparação Múltipla entre as Médias de Resistências ao Cisalhamento no Mesmo Plano

Para verificar a possível existência ou não de uma diferença significativa das resistências ao cisalhamento num mesmo plano, entre os três modelos de corpos-de-prova, será feito uso da tabela de análise de variância (ANOVA).

Esta comparação tem por base a distribuição “F”. O valor resultante da estatística deve ser comparado com a tabela de valores de F, que indica o valor máximo da estatística para o caso da hipótese inicial ser verdadeira, a um determinado nível de significância, no nosso caso 5% ($F_{0,05}$). Assim, se $F > F_{0,05}$ conclui-se que existe uma diferença significativa entre as médias analisadas, ou seja, a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada.

Para o desenvolvimento das análises adotou-se a função contida na planilha EXCEL 97 – ANOVA fator único.

4.10.1- Análise para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*

Com base nos valores de resistências ao cisalhamento obtidos para os três modelos de corpo-de-prova (estudado, estudado modificado e o da NBR 7190/97) no plano de cisalhamento longitudinal-tangencial (LT), tem-se a análise apresentada nas tabelas 4.23 e 4.24.

TABELA 4.23 – Resumo estatístico para os três corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano LT.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1 (E/LT)	12	99,52	8,29	0,67
Coluna 2 (EM/LT)	12	97,52	8,13	0,87
Coluna 3 (N/LT)	12	85,46	7,12	1,18

TABELA 4.24 – Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano LT.

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,64	2	4,82	5,33	0,01	3,28
Dentro dos grupos	29,85	33	0,90			
Total	39,49	35				

Como $F > F_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos três modelos de corpo-de-prova no plano de cisalhamento LT para a madeira ensaiada, com 95% de confiabilidade.

Com base nos valores de resistências ao cisalhamento obtidos para os três modelos de corpo-de-prova (estudado, estudado modificado e o da NBR 7190/97) no plano de cisalhamento longitudinal-radial (LR), tem-se a análise apresentada nas tabelas 4.25 e 4.26.

TABELA 4.25 – Resumo estatístico para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano LR.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1 (E/LR)	12	84,64	7,05	0,63
Coluna 2 (EM/LR)	12	84,92	7,08	0,87
Coluna 3 (N/LR)	12	75,02	6,25	0,84

TABELA 4.26 – Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano LR.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,30	2	2,65	3,39	0,05	3,28
Dentro dos grupos	25,77	33	0,78			
Total	31,07	35				

Como $F > F_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos três modelos de corpo-de-prova no plano de cisalhamento LR para a madeira ensaiada, com 95% de confiabilidade.

4.10.2- Análise para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii*

Com base nos valores de resistências ao cisalhamento obtidos para os três modelos de corpo-de-prova (estudado, estudado modificado e o da NBR 7190/97) no plano de cisalhamento longitudinal-tangencial (LT), tem-se a análise apresentada nas tabelas 4.27 e 4.28.

TABELA 4.27 – Resumo estatístico para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii* no plano LT.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1 (E/LT)	12	81,73	6,81	0,70
Coluna 2 (EM/LT)	12	77,37	6,45	0,50
Coluna 3 (N/LT)	12	65,7	5,48	1,24

TABELA 4.28 – Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii* no plano LT.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	11,45	2	5,72	7,04	0,00	3,28
Dentro dos grupos	26,84	33	0,81			
Total	38,29	35				

Como $F > F_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos três modelos de corpo-de-prova no plano de cisalhamento LT para a madeira ensaiada, com 95% de confiabilidade.

Com base nos valores de resistências ao cisalhamento obtidos para os três modelos de corpo-de-prova (estudado, estudado modificado e o da NBR 7190/97) no plano de cisalhamento longitudinal-radial (LR), tem-se a análise apresentada nas tabelas 4.29 e 4.30.

TABELA 4.29 – Resumo estatístico para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii* no plano LR.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1 (E/LR)	12	68,89	5,74	0,66
Coluna 2 (EM/LR)	12	66,74	5,56	0,60
Coluna 3 (N/LR)	12	62,17	5,18	0,70

TABELA 4.30 – Análise ANOVA para as resistências ao cisalhamento para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii* no plano LR.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,96	2	0,98	1,51	0,24	3,28
Dentro dos grupos	21,50	33	0,65			
Total	23,47	35				

Como $F < F_{\text{crítico}}$ verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe diferença significativa entre as médias dos três modelos de corpo-de-prova no plano de cisalhamento LR para a madeira ensaiada, com 95% de confiabilidade.

Com relação ao cálculo de “F”, NANNI (1986) esclarece que quando o valor de “F” indicar uma diferença significativa entre as médias é necessário fazer uma análise posterior para definir a média, ou médias, que diferem significativamente entre si. Neste estudo esta análise será feita por meio do Método de Duncan.

4.11- Método de Duncan entre os Ensaios

Embora concluído no item 4.10 que há diferença significativa entre os grupos de corpos-de-prova no que se refere à resistência ao cisalhamento no mesmo plano, ainda, não se pode afirmar qual, ou quais, modelos de corpos-de-prova diferem entre si. Assim para se fazer esta determinação será empregado o Método de Duncan que analisa as médias ou médias que diferem significativamente uma das outras.

4.11.1- Análise entre os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*

4.11.1.1- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano longitudinal-tangencial

Para uma melhor compreensão do Método será feita uma apresentação, de forma resumida, a fim de deixar transparente o critério adotado para se chegar às considerações finais do trabalho.

a) em primeiro lugar as médias das resistências ao cisalhamento são colocadas em ordem crescente.

Corpos-de-prova	N/LT	EM/LT	E/LT
Resistência (MPa)	7,12	8,13	8,29

b) determina-se o desvio padrão das médias (S_x^-)

$$S_x^- = \frac{S}{\sqrt{n_h}}$$

sendo:

$S = \sqrt{MQR}$, onde MQR é a média dos quadrados dos resíduos.

Portanto: $S = \sqrt{0,90} = 0,95$

Calcula-se agora a média harmônica:

$$\frac{1}{n_h} = \frac{\sum \frac{1}{n_i}}{K} = \frac{\frac{1}{12} + \frac{1}{12} + \frac{1}{12}}{3} = 12$$

sendo:

K = número de grupos;

n_i = número de elementos de cada grupo;

n_h = média harmônica entre os n_i .

Temos portanto:

$$S_x^- = \frac{0,95}{\sqrt{12}} = 0,275$$

c) usando-se a tabela “Studentized Range” em NANNI (1986) determina-se os valores de R_k onde $R_k = S_x^- \cdot r_k$, que depende do número de classificações dos graus de liberdade de “S” e do nível de significância, aqui adotado como 0,05.

Determinado os graus de liberdade GDL=N-K (GDL=33), da tabela tira-se os valores de r_k .

	Número de grupos	
r_k	2	3
GDL=33	2,89	3,48

Temos os seguintes valores de R_k :

$R_2 = S_x^- . 2,89 = 0,79$

$R_3 = S_x^- . 3,48 = 0,96$

Sendo R_k a máxima diferença entre as médias para que elas sejam consideradas iguais.

d) As comparações são realizadas em função das diferenças entre as médias ordenadas, chamadas $\overline{X}_{(j)}$, com os valores de R_k da seguinte maneira: $\overline{X}_{(E/LT)} - \overline{X}_{(N/LT)}$ com R_3 ; $\overline{X}_{(E/LT)} - \overline{X}_{(EM/LT)}$ com R_2 e $\overline{X}_{(EM/LT)} - \overline{X}_{(N/LT)}$ com R_2 .

Para facilitar a visualização destas comparações elaborou-se o desenho esquemático, apresentado na figura 4.13.

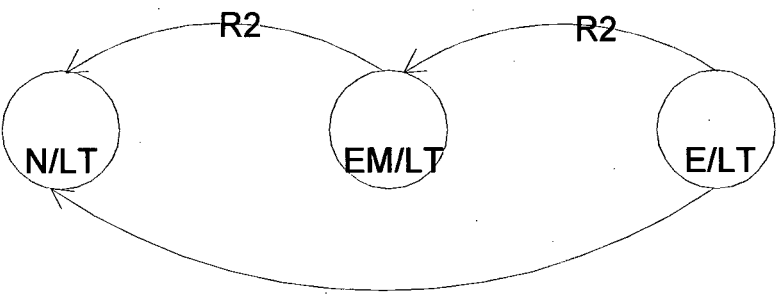


FIGURA 4.13 – Esquema das comparações das médias de resistência ao cisalhamento para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano LT.

Se a diferença entre as médias de resistência ao cisalhamento dos corpos-de-prova ensaiados for maior que o correspondente valor de R_i , a diferença é declarada significativa e será adotada a nomenclatura (DS). Caso contrário é declarada não significativa e sua nomenclatura será (NDS). Estas comparações estão apresentadas na tabela 4.31.

TABELA 4.31 – Resultado do método de Duncan para dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano LT.

Corpos-de-prova	Diferença entre as médias	Comparações	Conclusão
N/LT e E/LT	$X_{(E/LT)} - X_{(N/LT)} = 1,17$	$1,17 > 0,96 (R_3)$	DS
EM/LT e E/LT	$X_{(E/LT)} - X_{(EM/LT)} = 0,16$	$0,16 < 0,79 (R_2)$	NDS
N/LT e EM/LT	$X_{(EM/LT)} - X_{(N/LT)} = 1,01$	$1,01 > 0,79 (R_2)$	DS

Por meio do método de Duncan pode-se concluir para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano longitudinal-tangencial que:

- Existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado e o da Norma Brasileira NBR 7190/97.
- Não existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado e o estudado modificado.
- Existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado modificado e o da Norma Brasileira NBR 7190/97.

4.11.1.2- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano longitudinal-radial

Para a análise das resistências ao cisalhamento no plano LR utilizou-se a mesma metodologia descrita no item 4.11.1.1. Na tabela 4.32 encontram-se os resultados fornecidos pelo método de Duncan.

TABELA 4.32 – Resultado do método de Duncan para dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano LR.

Corpos-de-prova	Diferença entre as médias	Comparações	Conclusão
N/LR e EM/LR	$X_{(EM/LR)} - X_{(N/LR)} = 0,83$	$0,83 < 0,89 (R_3)$	NDS
EM/LR e E/LR	$X_{(E/LR)} - X_{(EM/LR)} = 0,16$	$0,16 < 0,74 (R_2)$	NDS
N/LR e E/LR	$X_{(E/LR)} - X_{(N/LR)} = 0,80$	$0,80 > 0,74 (R_2)$	DS

Por meio do método de Duncan pode-se concluir para os corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* no plano longitudinal-radial, que:

- Existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado e o da Norma Brasileira NBR 7190/97.
- Não existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado e o estudado modificado.
- Não existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado modificado e o da Norma Brasileira NBR 7190/97.

4.11.2- Análise entre os corpos-de-prova de *Pinus elliottii*

4.11.2.1- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano longitudinal-tangencial

Para a análise das resistências ao cisalhamento no plano LT utilizou-se a mesma metodologia descrita no item 4.11.1.1. Na tabela 4.33 encontram-se os resultados fornecidos pelo método de Duncan.

TABELA 4.33 – Resultado do método de Duncan para dos corpos-de-prova de *Pinus elliottii* no plano LT.

Corpos-de-prova	Diferença entre as médias	Comparações	Conclusão
N/LT e E/LT	$X_{(E/LT)} - X_{(N/LT)} = 1,33$	$1,33 > 0,90 (R_3)$	DS
EM/LT e E/LT	$X_{(E/LT)} - X_{(EM/LT)} = 0,36$	$0,36 < 0,75 (R_2)$	NDS
N/LT e EM/LT	$X_{(EM/LT)} - X_{(N/LT)} = 0,97$	$0,97 > 0,75 (R_2)$	DS

Por meio do método de Duncan pode-se concluir para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii* no plano longitudinal-tangencial, que:

- Existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado e as obtidas pelo corpo-de-prova da NBR 7190/97.
- Não existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado e as obtidas pelo corpo-de-prova estudado modificado.
- Existe diferença significativa entre as resistências ao cisalhamento obtidas pelo corpo-de-prova estudado modificado e as obtidas pelo corpo-de-prova da NBR 7190/97.

4.11.2.2- Análise entre os três modelos de corpos-de-prova no plano longitudinal-radial

A análise realizada no item 4.10.2 para os corpos-de-prova de *Pinus elliottii* no plano longitudinal-radial mostrou não haver diferença significativa entre as médias dos

três modelos de corpo-de-prova, neste plano de cisalhamento. Portanto, não é necessário fazer a análise posterior para definir as médias que diferem significativamente entre si.

4.12- Conclusões da Análise Experimental

Com os dados dos ensaios de cisalhamento obtidos para os três modelos de corpos-de-prova, juntamente com os valores da análise estatística, chegou-se às conclusões a seguir. São também apresentadas algumas conclusões relativas aos dois métodos utilizados neste trabalho na obtenção do teor de umidade dos lotes de madeira.

- Para as duas espécies de madeiras estudadas os coeficientes de variação encontrados para os corpos-de-prova da NBR 7190/97, no que se refere à resistência ao cisalhamento, apresentaram-se mais altos que os obtidos pelos corpos-de-prova estudado e estudado modificado, o que mostra para estes uma menor variabilidade entre os dados.

- As médias das resistências ao cisalhamento calculadas para os corpos-de-prova estudado e estudado modificado foram, para as duas espécies de madeiras, maiores que as médias obtidas para o corpo-de-prova da NBR 7190/97. Possivelmente, estes valores mais baixos devem-se a formação de um binário no corpo-de-prova da norma brasileira, em função da excentricidade imposta durante o carregamento, descritos por alguns autores e constatado neste trabalho.

- No que se refere à análise destas médias de resistência, conclui-se que existe diferença significativa entre os planos de cisalhamento LT e LR para os três modelos de corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*. Diferença esta que também existe para os corpos-de-prova estudado e estudado modificado de *Pinus elliottii*. Isto mostra a influência dos raios medulares, dispostos paralelos ou não à direção do esforço.

- Entretanto, para o corpo-de-prova da NBR 7190/97 não foi encontrada diferença significativa entre os planos de cisalhamento. Possivelmente, este fato pode ter acontecido em virtude da utilização de uma barra de outra tora de *Pinus elliottii* para a confecção de alguns destes corpos-de-prova em função do problema ocorrido durante a secagem em estufa.

- Nos corpos-de-prova estudado e estudado modificado de ambas as espécies de madeiras e nos dois planos de cisalhamento, não foram encontradas diferenças significativas entre as resistências ao cisalhamento.

- Entre o corpo-de-prova estudado e o preconizado pela NBR 7190/97 de ambas espécies de madeiras e nos dois planos de cisalhamento, encontrou-se diferença significativa nas resistências ao cisalhamento. Esta diferença, possivelmente, pode vir a

mostrar que existe no corpo-de-prova da Norma Brasileira um complexo estado de tensões produzindo rupturas por uma combinação de tensões de cisalhamento associadas a tensões normais às fibras, fornecendo assim valores mais baixos que os obtidos pelo corpo-de-prova estudado.

- Entre os dois métodos avaliados para determinar o teor de umidade dos lotes de madeiras pode-se chegar a algumas conclusões. Os valores obtidos pela Norma Brasileira apresentam um coeficiente de variação menor, o que mostra uma menor variabilidade dos dados.

- Obteve-se da análise estatística que não existe diferença significativa entre os valores de umidade obtidos pelos dois métodos. Isto mostra uma boa calibração do equipamento Sylvatest, para os níveis de umidade avaliados, com relação aos valores obtidos pelo ensaio normalizado.

5- ANÁLISE NUMÉRICA

5.1- Introdução

Neste capítulo é apresentada a análise numérica para os três modelos de corpos-de-prova ensaiados experimentalmente. Inicialmente é exposta uma revisão do Método dos Elementos Finitos (MEF), com a formulação em termos de deslocamentos.

São consideradas neste trabalho estruturas planas sob estado plano de tensão, discretizadas por elementos finitos quadriláteros de nove nós denominado elemento Lagrangeano. São consideradas também estruturas discretizadas por elementos finitos sólidos de 8 nós, denominado tri-linear.

5.2- Formulação do Método dos Elementos Finitos

Neste item são apresentadas as formulações básicas do MEF em termos de deslocamentos, para elementos planos de 4 a 9 nós e elementos sólidos de 8 nós.

5.2.1- Elementos Planos Retangulares

Consideram-se elementos quadriláteros com número variável de nós (de 4 a 9). Tanto as coordenadas do elemento como o campo de deslocamentos no elemento são expressos em função de valores nodais, através de funções de interpolação. Adota-se a formulação isoparamétrica em que as funções de interpolação são definidas em relação ao sistema de coordenadas naturais do elemento, cujas variáveis ξ e η variam de -1 a $+1$.

As coordenadas x , y do elemento são definidas por:

$$x = \sum_{i=1}^m H_i x_i \quad (5.1)$$

$$y = \sum_{i=1}^m H_i y_i$$

onde x_i, y_i são as coordenadas do nó i , m é o número de nós necessários para definir a geometria do elemento e $H_i = H_i(\xi, \eta)$ são as funções de interpolação.

O campo de deslocamentos u, v , correspondente às direções x, y , em qualquer ponto (ξ, η) no elemento é dado por:

$$\begin{aligned} u(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^n N_i u_i \\ v(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^n N_i v_i \end{aligned} \quad (5.2)$$

onde u_i, v_i são os deslocamentos do nó i , n é o número de nós no elemento, que define o grau do polinômio contido nas funções de interpolação $N_i = N_i(\xi, \eta)$.

Quando $m=n$ as funções H e N são idênticas e o elemento é dito isoparamétrico. Neste caso os mesmos nós são utilizados para interpolar tanto as coordenadas quanto os deslocamentos. Quando $m < n$ o elemento é dito sub-paramétrico, ou seja o grau do polinômio nas funções H é menor do que o das funções N . Quando um maior número de nós é utilizado para interpolar deslocamentos, ou seja $m > n$, o elemento é dito superparamétrico.

O elemento quadrilátero de 4 nós, conhecido como elemento bilinear, é um elemento isoparamétrico. A geometria deste elemento e o mapeamento que relaciona os sistemas de coordenadas x, y e ξ, η , definido pela equação (5.1), estão mostrados na figura 5.1. As funções de interpolação para este elemento são apresentadas na equação (5.3).

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_i) \cdot (1 + \eta \eta_i) \quad (5.3)$$

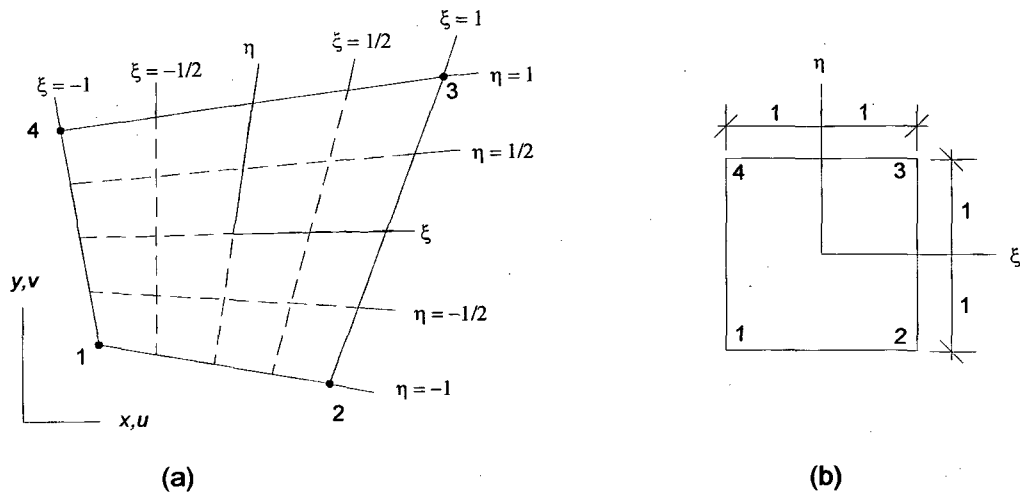


FIGURA 5.1 - (a) Elemento plano bilinear no sistema x, y ; (b) Elemento plano bilinear no sistema de coordenadas naturais ξ, η . Fonte: COOK et al. (1989).

Para os elementos planos com 5 a 9 nós, como mostra a figura 5.2, as funções de interpolação descritas em COOK et al. (1989) e BATHE (1996), são apresentadas na equação. (5.4).

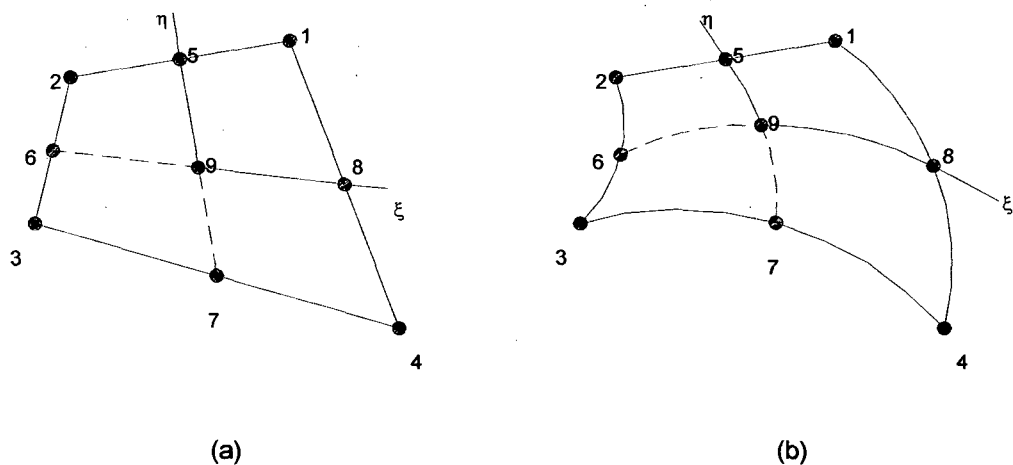


FIGURA 5.2 - (a) Elemento plano quadrático de 8, 9 nós de lados retos; (b) Elemento plano quadrático de 8, 9 nós de lados curvos. Fonte: COOK et al. (1989).

$$\begin{aligned}
N_1 &= \frac{1}{4}(1+\xi).(1+\eta) - \frac{1}{2}N_5 - \frac{1}{2}N_8 - \frac{1}{4}N_9 \\
N_2 &= \frac{1}{4}(1-\xi).(1+\eta) - \frac{1}{2}N_5 - \frac{1}{2}N_6 - \frac{1}{4}N_9 \\
N_3 &= \frac{1}{4}(1-\xi).(1-\eta) - \frac{1}{2}N_6 - \frac{1}{2}N_7 - \frac{1}{4}N_9 \\
N_4 &= \frac{1}{4}(1+\xi).(1-\eta) - \frac{1}{2}N_7 - \frac{1}{2}N_8 - \frac{1}{4}N_9
\end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned}
N_5 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2).(1+\eta) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_6 &= \frac{1}{2}(1-\xi).(1-\eta^2) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_7 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2).(1-\eta) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_8 &= \frac{1}{2}(1+\xi).(1-\eta^2) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_9 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2).(1-\eta^2)
\end{aligned}$$

Sendo que $N_i=0$ quando o nó i não estiver presente no elemento. Os elementos isoparamétricos de 8 ou 9 nós podem ter seus lados curvos (parabólicos) e são portanto adequados para modelar estruturas com geometria curva. Neste trabalho são utilizados elementos isoparamétricos de 9 nós.

A equação (5.2) pode ser escrita sob forma matricial:

$$u^e = \begin{Bmatrix} u(\xi, \eta) \\ v(\xi, \eta) \end{Bmatrix} = N u \tag{5.5}$$

onde u^e é o campo de deslocamentos, u é o vetor de deslocamentos nodais e N é a matriz de funções de forma ou de interpolação.

$$u = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ \vdots \end{Bmatrix} ; \quad N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & \dots \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Para pequenas deformações específicas as equações de compatibilidade que relacionam deformações específicas – deslocamentos são dadas pela equação (5.7):

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Como u e v são expressos em função de ξ e η e não de x e y , deve-se aplicar a Regra da Cadeia, como mostra a equação (5.8):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial u}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial u}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{\partial v}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{\partial v}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{aligned} \quad (5.8)$$

As derivadas de ξ e η em relação a x e y não podem ser encontradas diretamente usando-se as equações vistas anteriormente. Devido a isto, escrevem-se inicialmente as relações entre os operadores diferenciais nos dois sistemas de coordenadas, utilizando-se as equações (5.9):

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \xi} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta}\end{aligned}\tag{5.9}$$

ou, matricialmente:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix}\tag{5.10}$$

onde J é chamada de matriz Jacobiana. As deformações específicas no elemento são obtidas utilizando-se expressões inversas das descritas na equação (5.10), conforme a equação (5.11).

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} = \Gamma \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{Bmatrix}\tag{5.11}$$

onde Γ é a inversa de J :

$$\Gamma = \frac{1}{\det. J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix}\tag{5.12}$$

sendo $\det. J$ o determinante da matriz Jacobiana: $\det. J = J_{11}J_{22} - J_{21}J_{12}$ que para o caso de elementos retangulares ou paralelogramos é uma constante.

A partir da matriz Jacobiana e sua inversa, torna-se possível relacionar as deformações específicas em qualquer ponto (ξ, η) no elemento com os deslocamentos nodais. Estas relações, sob forma matricial, estão apresentadas na equação (5.13).

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = B u \quad (5.13)$$

onde ε é o vetor de deformações específicas, u é o vetor de deslocamentos nodais e B é a matriz deformação específica-deslocamento, obtida substituindo-se as equações (5.2) em (5.7):

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial x} &= \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} &= \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{aligned} \quad (5.14)$$

onde N_i depende do número de nós no elemento quadrilátero.

As equações de equilíbrio no elemento podem ser obtidas aplicando-se o Princípio da Energia Potencial Mínima. O Método dos Elementos Finitos pode ser interpretado como uma modificação do Método Variacional de Rayleigh-Ritz, em que o domínio da integração do funcional é subdividido em regiões ou elementos e a base das funções de aproximação é formada por funções de interpolação que interpolam os deslocamentos nodais.

Assim, parte-se de um campo de deslocamentos admissível para o qual escreve-se o funcional de energia potencial total do elemento, equação (5.15).

$$\Pi_p = U + V \quad (5.15)$$

onde V é o potencial das cargas externas e U é a energia de deformação interna:

$$U = \int_{V^e} U_o \, dV^e \quad (5.16)$$

em que V^e é o volume do elemento, U_o é a energia de deformação por unidade de volume, que para um material elástico-linear é definida pela equação (5.17):

$$U_o = \frac{1}{2} \varepsilon^T \sigma \quad (5.17)$$

sendo σ o vetor das tensões atuantes no elemento, que pode ser relacionado com o vetor de deformações específicas através da matriz constitutiva D , na equação (5.18).

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = D \varepsilon \quad (5.18)$$

Para estruturas sob estado plano de tensões, particularizada para os eixos 1 e 2, compostas de material ortotrópico, elástico-linear, a matriz constitutiva é definida pela equação (5.19).

$$D = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

sendo:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E_1 E_2}{E_2 - E_1 (\nu_{21})^2} \\ C_{12} = C_{21} &= \frac{E_1 E_2 \nu_{21}}{E_2 - E_1 (\nu_{21})^2} \\ C_{22} &= \frac{E_1 E_2}{E_1 - E_2 (\nu_{12})^2} \\ C_{33} &= G_{12} \end{aligned} \quad (5.20)$$

onde E_i é o módulo de elasticidade na direção i , ν_{ij} é o Coeficiente de Poisson do material nas direções i, j e G_{ij} é módulo de cisalhamento nas direções i, j .

O potencial de cargas externas do elemento, desprezando-se as tensões e deformações iniciais e supondo-se que as reações não produzem trabalho, é dado pela equação (5.21).

$$V = - \int_{V^e} u^{eT} b \, dV^e - \int_{S_\sigma^e} u^{eT} \bar{p} \, dS^e - u^T f_n \quad (5.21)$$

em que $b = \begin{bmatrix} b_x & b_y \end{bmatrix}^T$ são as cargas de volume; $\bar{p} = \begin{bmatrix} \bar{p}_x & \bar{p}_y \end{bmatrix}^T$ são as cargas de superfície prescritas no elemento; S_σ^e é a parte do contorno do elemento com cargas prescritas e f_n é o vetor de cargas aplicadas nos nós do elemento.

Entre todos os campos de deslocamentos admissíveis, aquele que torna estacionário o potencial de cargas total é o que corresponde a uma configuração de equilíbrio, sendo que para que o equilíbrio seja estável Π_p deve ser mínimo.

As equações de equilíbrio são então encontradas aplicando-se a condição de estacionariedade ao funcional Π_p :

$$\delta \Pi_p = \delta(U + V) = 0 \quad (5.22)$$

ou, substituindo-se as equações (5.16), (5.17) e (5.21):

$$\int_{V^e} \delta \varepsilon^T \sigma \, dV^e - \delta u^T f_n - \int_{V^e} \delta u^{eT} b \, dV^e - \int_{S_\sigma^e} \delta u^{eT} \bar{p} \, dS^e = 0 \quad (5.23)$$

Substituindo-se as equações (5.5), (5.13) e (5.18) na equação (5.23) tem-se:

$$\delta u^T \left[\int_{V^e} B^T D B \, dV \right] u = \delta u^T (f_n + f_e) = \delta u^T f \quad (5.24)$$

onde f é o vetor de forças nodais total e f_e representa o vetor de forças nodais equivalente a cargas atuantes no volume e na superfície do elemento, conforme mostra a equação (5.25):

$$f_e = \int_{V^e} N^T b \, dV^e + \int_{S_\sigma^e} N^T \bar{p} \, dS^e \quad (5.25)$$

Como δu^T é arbitrário, para que as equações (5.24) sejam satisfeitas deve-se ter:

$$k u = f \quad (5.26)$$

que é a equação de equilíbrio de cada elemento, sendo k a matriz de rigidez do elemento definida pela equação (5.27):

$$k = \int_{V^e} B^T D B dV^e \quad (5.27)$$

em que $dV^e = t dx dy$, sendo t a espessura do elemento, e , tendo em vista que, conforme COOK et al. (1989), $dx dy = \det . J d\xi d\eta$, assim a equação (5.27) pode ser reescrita conforme a expressão (5.28):

$$k = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T D B t \det . J d\xi d\eta \quad (5.28)$$

Somando-se a contribuição de todos os elementos e introduzindo-se as condições de contorno, chega-se ao sistema de equações algébricas que regem o equilíbrio da estrutura:

$$K U = F \quad (5.29)$$

sendo F o vetor de forças nodais, K a matriz de rigidez global da estrutura obtida das matrizes de rigidez de cada elemento k e U o vetor de deslocamentos nodais da estrutura.

Resolvendo-se o sistema de equações (5.29), obtém-se U , e a partir deste extrai-se u para cada elemento. A partir de u e através das equações (5.13) e (5.18), obtém-se então as tensões σ em qualquer ponto (ξ, η) dentro do elemento.

5.2.2- Elementos Sólidos

A formulação isoparamétrica em três dimensões é semelhante a formulação para elementos em duas dimensões, descrita no item 5.2.1.

Neste item é considerada a formulação para o elemento sólido, também chamado tri-linear, com 8 nós. As funções de interpolação são definidas em relação ao sistema de coordenadas naturais do elemento, cujas variáveis ξ , η e ζ variam de -1 a $+1$.

As coordenadas x , y , z do elemento são definidas por:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^m H_i x_i \\ y &= \sum_{i=1}^m H_i y_i \\ z &= \sum_{i=1}^m H_i z_i \end{aligned} \quad (5.30)$$

onde x_i , y_i , z_i são as coordenadas do nó i , m é o número de nós necessários para definir a geometria do elemento e $H_i = H_i(\xi, \eta, \zeta)$ são as funções de interpolação.

O campo de deslocamentos u , v , w , correspondente às direções x , y , z , em qualquer ponto (ξ, η, ζ) no elemento é dado por:

$$\begin{aligned} u(\xi, \eta, \zeta) &= \sum_{i=1}^n N_i u_i \\ v(\xi, \eta, \zeta) &= \sum_{i=1}^n N_i v_i \\ w(\xi, \eta, \zeta) &= \sum_{i=1}^n N_i w_i \end{aligned} \quad (5.31)$$

onde u_i , v_i , w_i são os deslocamentos do nó i , n é o número de nós no elemento, que define o grau do polinômio contido nas funções de interpolação $N_i = N_i(\xi, \eta, \zeta)$.

O elemento sólido de 8 nós, conhecido como elemento tri-linear, é um elemento isoparamétrico ($H=N$). A geometria deste elemento e o mapeamento que relaciona os sistemas de coordenadas x , y , z e ξ , η , ζ definido pela equação (5.30), estão mostrados na figura 5.3. As funções de interpolação para este elemento são apresentadas na equação (5.32).

$$N_i = \frac{1}{8} (1 \pm \xi) \cdot (1 \pm \eta) \cdot (1 \pm \zeta) \quad (5.32)$$

onde i varia de 1 a 8.

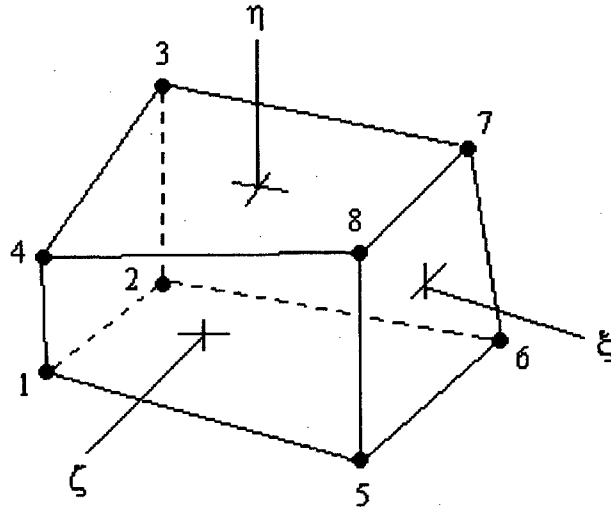


FIGURA 5.3 - Elemento sólido de 8 nós, também chamado de elemento trilinear. Fonte: COOK et al. (1989).

A equação. (5.31) pode ser escrita sob forma matricial:

$$u^e = \begin{Bmatrix} u(\xi, \eta, \zeta) \\ v(\xi, \eta, \zeta) \\ w(\xi, \eta, \zeta) \end{Bmatrix} = N u \quad (5.33)$$

onde u^e é o campo de deslocamentos; u é o vetor de deslocamentos nodais e N é a matriz de funções de forma ou de interpolação, definidas na equação (5.32).

As relações deformações específicas - deslocamento ficam:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\
\gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\
\gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}
\end{aligned} \tag{5.34}$$

que também podem ser escritas matricialmente, $\varepsilon = Bu$, utilizando-se as equações (5.33).

Para um material ortotrópico, a matriz constitutiva D que relaciona tensões com deformações específicas ($\sigma = D\varepsilon$), pode ser obtida invertendo-se a matriz de flexibilidade do material definida mais adiante, equação (5.41).

A equação de equilíbrio de cada elemento é a mesma vista anteriormente $ku = f$, sendo que para elementos sólidos, a matriz k é expressa por:

$$k = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T D B \det J d\xi d\eta d\zeta \tag{5.35}$$

em que a relação entre os volumes infinitesimais nos dois sistemas de coordenadas é expressa através do Jacobiano, ou determinante da matriz jacobiana, COOK et al. (1989), $dx dy dz = \det J d\xi d\eta d\zeta$.

5.2.3- Modos Incompatíveis de Wilson

WILSON et al. (1973) apud LA ROVERE (1993) propuseram a partir de um elemento bilinear de 4 nós, (Q4), uma maneira de melhorar o comportamento à flexão do elemento. Os autores adicionaram modos incompatíveis, $(1 - \xi^2)$ e $(1 - \eta^2)$, ao campo bilinear de deslocamentos do elemento:

$$\begin{aligned} u &= \sum N_i u_i + (1 - \xi^2)a_1 + (1 - \eta^2)a_2 \\ v &= \sum N_i v_i + (1 - \xi^2)a_3 + (1 - \eta^2)a_4 \end{aligned} \quad (5.36)$$

onde os a_i são os graus de liberdade que não estão associados a nenhum nó. Para o elemento plano, $i=1, 2, 3, 4$ e N_i são dadas pela equação (5.3).

Estes elementos são chamados de incompatíveis pois apresentam variações parabólicas de deslocamento nos seus lados que são ligados apenas por 2 nós. Na figura 5.4 é mostrado um elemento plano de 4 nós com modos incompatíveis, chamado de Q6.

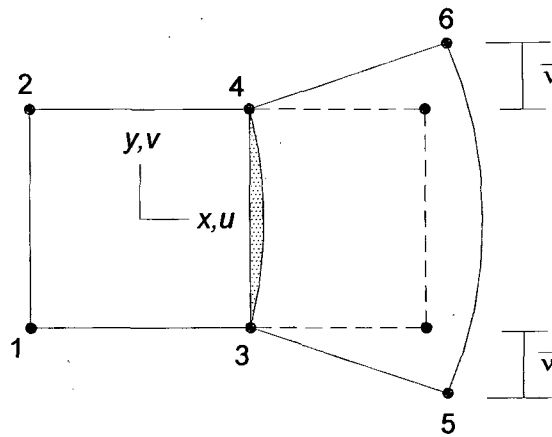


FIGURA 5.4 - Elementos planos incompatíveis adjacentes. Fonte: COOK et al. (1989).

Analogamente, para o caso do elemento sólido de 8 nós, adicionam-se modos incompatíveis $(1 - \xi^2)$, $(1 - \eta^2)$ e $(1 - \zeta^2)$ ao campo trilinear de deslocamentos do elemento.

$$\begin{aligned} u &= \sum N_i u_i + (1 - \xi^2)a_1 + (1 - \eta^2)a_2 + (1 - \zeta^2)a_7 \\ v &= \sum N_i v_i + (1 - \xi^2)a_3 + (1 - \eta^2)a_4 + (1 - \zeta^2)a_8 \\ w &= \sum N_i w_i + (1 - \xi^2)a_5 + (1 - \eta^2)a_6 + (1 - \zeta^2)a_9 \end{aligned} \quad (5.37)$$

onde as funções N_i ($i=1$ a 8) são dadas pela equação (5.32).

Após a obtenção da matriz de rigidez do elemento, k , pelas expressões (5.28) ou (5.35), condensam-se estaticamente os graus de liberdade a_i que não são associados a nenhum nó.

5.3- Equações Constitutivas para a Madeira

BODIG e JAINE (1982) mostraram que a lei de Hooke generalizada é a que melhor representa o aspecto do comportamento ortotrópico da madeira. Segundo os autores esta lei pode ser estabelecida, através de um experimento, considerando que as tensões são aplicadas em um elemento de volume extraído de um pequeno bloco de madeira isento de defeitos.

No elemento volumétrico da figura 5.5 são mostradas as tensões, σ_{ij} , em um elemento sólido infinitesimal. As componentes de deformação, ϵ_{ij} , são determinadas a partir do deslocamento de um ponto interno neste elemento.

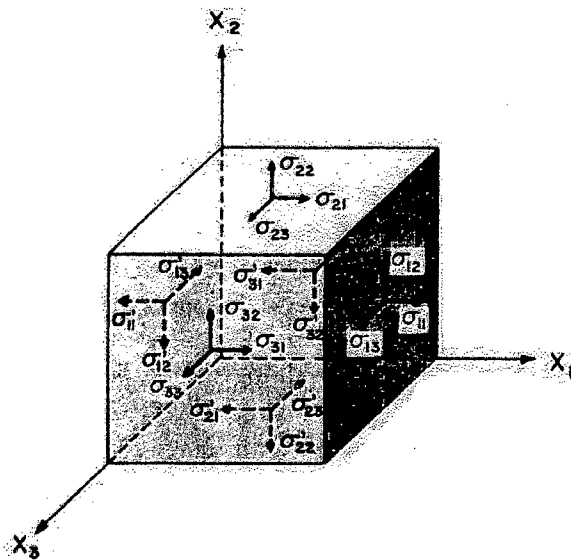


FIGURA 5.5 – Componentes de tensão de um sistema em coordenadas retangulares.
Fonte: BODIG e JAYNE (1982).

A relação tensão-deformação expressa pela lei de Hooke generalizada está baseada no comportamento elástico-linear do material.

A forma tensorial da lei de Hooke possui 9 componentes de tensão, σ_{ij} , e 9 componentes de deformação, ϵ_{ij} . Desta maneira, o tensor de rigidez, C_{ijkl} , e o tensor de deformabilidade, S_{ijkl} , tem 81 coeficientes. Tem-se então:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (5.38)$$

em que ε_{kl} com $k,l=1,2,3$ são as deformações normais e de cisalhamento, respectivamente, σ_{ij} com $i,j=1,2,3$ são as tensões normais e de cisalhamento, respectivamente e C_{ijkl} , com $i,j=1,2$ e 3 e $k,l=1, 2$ e 3 são os elementos do tensor de rigidez do material.

Da mesma forma, a relação deformação-tensão é dada por:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (5.39)$$

sendo S_{ijkl} o tensor de flexibilidade.

Um material de comportamento ortotrópico necessita de nove termos na matriz de flexibilidade para ser completamente definido, BOGIG e JAYNE (1982) e MASCIA (1991).

Pode-se escrever os componentes de S_{ijkl} e C_{ijkl} nos termos das constantes de engenharia, ou seja, módulo de elasticidade longitudinal E , módulo de elasticidade transversal G e Coeficiente de Poisson ν . Desta maneira tem-se:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.40)$$

em que ε_i e γ_{ij} com $i,j=1,2,3$ são as deformações normais e de cisalhamento, respectivamente, σ_i e τ_{ij} com $i,j=1,2,3$ são as tensões normais e de cisalhamento, respectivamente e S_{ij} , com $i,j=1,2,...,6$ são os elementos da matriz de flexibilidade do material.

Para materiais de comportamento ortotrópico a matriz de flexibilidade, expressa em termos das constantes de engenharia é dada pela equação (5.41):

$$S = \begin{Bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{Bmatrix} \quad (5.41)$$

sendo E_1 , E_2 e E_3 os módulos de elasticidade nas direções 1, 2 e 3 respectivamente; G_{12} , G_{23} e G_{31} são os módulos de elasticidade transversal de cisalhamento, nos planos 1-2, 2-3 e 3-1, respectivamente; $\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$ são os seis valores de Coeficientes de Poisson.

A hipótese de ortotropia combinada com a simetria dos coeficientes elásticos implica em:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (5.42)$$

para $i, j = 1, 2, 3$.

Uma outra maneira de representar a equação (5.40) é apresentada em BODIG e JAYNE (1982) onde as seções das peças estruturais de madeira são analisadas em um sistema de coordenadas retangulares como materiais ortotrópicos com eixos X_1 , X_2 , X_3 e eixos ortotrópicos coincidentes, de acordo com a figura 5.6.

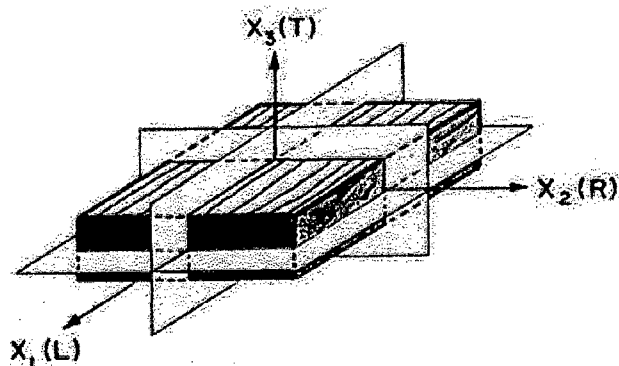


FIGURA 5.6 – Eixos ortotrópicos para um bloco de madeira maciça isenta de defeitos.
Fonte: BODIG e JAYNE (1982).

Desta maneira a equação matricial (5.41) pode ser representada para madeira, substituindo-se os subscritos 1 por L, 2 por R e 3 por T, equação (5.43).

$$S = \begin{Bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{Bmatrix} \quad (5.43)$$

5.4- Modelagem dos Corpos-de-prova

O Método dos Elementos Finitos foi utilizado para obter a distribuição de tensões que surgem nos ensaios de cisalhamento. Os modelos dos corpos-de-prova foram desenvolvidos no Laboratório de Análise em Estruturas – LAE/UFSC. O programa SAP 2000 foi utilizado nas análises.

Nas análises a madeira é admitida como um material ortotrópico cujos eixos de ortotropia coincidem com a orientação predominante das fibras (L), com a direção

radial (R) e tangencial (T) dos anéis de crescimento. É considerado apenas o regime elástico-linear do material.

Como uma das espécies de madeiras estudadas foi o Pinus, optou-se em utilizar nos modelos as propriedades elásticas determinadas por MASCIA (1991) para a madeira de Pinus.

As propriedades utilizadas para os modelos foram: módulos de elasticidade $E_L=5471,0\text{MPa}$, $E_R=1049,4\text{MPa}$, $E_T=737,6\text{MPa}$; módulos de elasticidade transversal: $G_{LR}=542,6\text{MPa}$, $G_{LT}=307,0\text{MPa}$, $G_{RT}=116,3\text{MPa}$ e Coeficientes de Poisson: $\nu_{LR}=0,3701$, $\nu_{LT}=0,3346$, $\nu_{RT}=0,6393$.

A descrição dos modelos numéricos para os corpos-de-prova da NBR 7190/97, estudado e estudado modificado estão apresentados a seguir, respectivamente.

5.4.1- Corpo-de-prova da Norma Brasileira

5.4.1.1- Apresentação do modelo e análise numérica

O corpo-de-prova foi modelado utilizando-se elementos sólidos de 8 nós, com modos incompatíveis e três graus de liberdade em cada nó.

Denomina-se no modelo “z” o eixo vertical ao longo da altura, “y” o eixo horizontal ao longo da espessura e “x” o eixo horizontal ao longo do comprimento do corpo-de-prova. A origem do sistema de eixos encontra-se no vértice inferior esquerdo, na face frontal, figura 5.7.

Inicialmente foi adotada uma malha com elementos de 0,5cm de arestas. Não foram observadas descontinuidades significativas nas tensões entre os elementos, portanto esta malha foi considerada adequada.

As direções longitudinal, radial e tangencial foram dispostas no corpo-de-prova de maneira que o plano da seção crítica de cisalhamento ficasse paralelo à direção radial da madeira, conforme a prescrição da Norma Brasileira NBR 7190/97.

O modelo apresenta 2178 nós, distribuídos em 1700 elementos. Os apoios foram definidos em função das condições previstas para a realização dos ensaios experimentais. Os deslocamentos nodais na base foram impedidos na direção horizontal “y” para simular a existência de atrito e na direção vertical “z”. Os apoios na face

vertical do corpo-de-prova simulam o impedimento promovido pelo dispositivo de ensaio. Os apoios utilizados pelo cutelo simulam o impedimento do deslocamento vertical e a rotação de sua parte superior. A carga foi aplicada uniformemente distribuída ao longo da região enfraquecida, na direção “z”.

Foi aplicado no corpo-de-prova um carregamento de 15,0kN, para gerar uma tensão de cisalhamento de 6,0MPa, relativa ao valor médio, obtido no ensaio experimental para a madeira de *Pinus elliottii*.

Na figura 5.7 pode ser vista a geometria da malha do corpo-de-prova da Norma Brasileira.

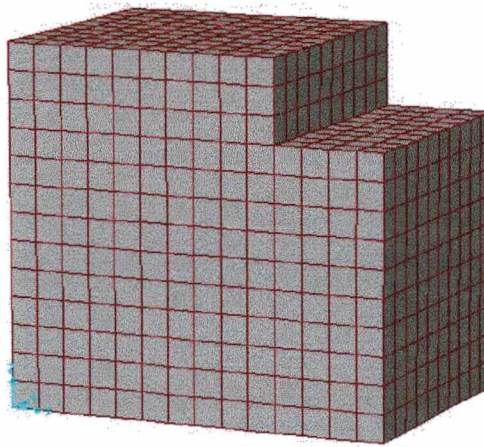


FIGURA 5.7 – Disposição da malha de elementos do corpo-de-prova da Norma Brasileira.

5.4.1.2- Análise dos resultados e conclusões

A figura 5.8 apresenta a distribuição de tensões de cisalhamento, τ_{xz} , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.9 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos, localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó, na linha média da seção crítica).

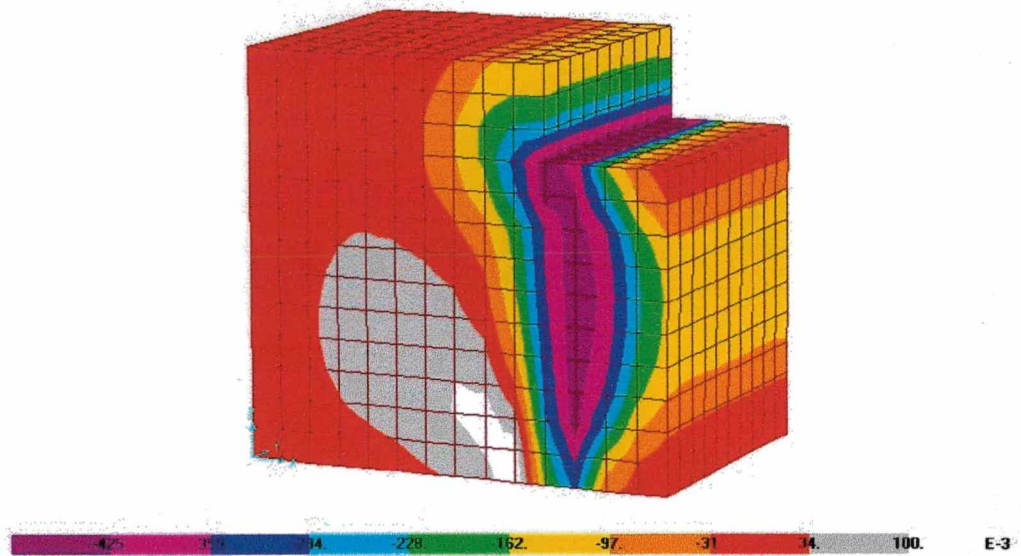


FIGURA 5.8 - Distribuição de tensões τ_{xz} no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (kN/cm^2).

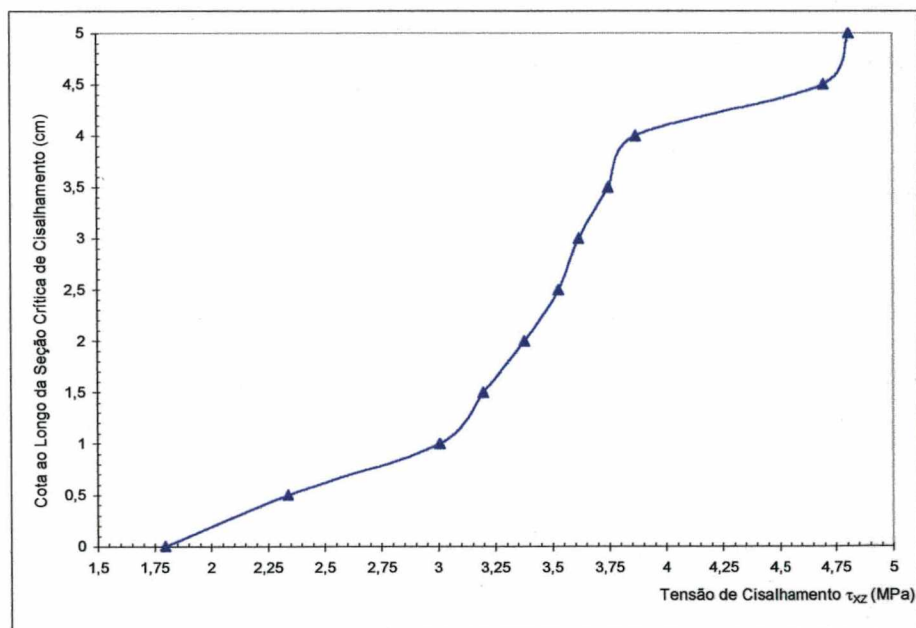


FIGURA 5.9 - Diagrama de tensões τ_{xz} ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (MPa).

Na figura 5.10 está apresentada a distribuição de tensões normais na direção “z”, σ_z , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.11 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos, localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó, na linha média da seção crítica).

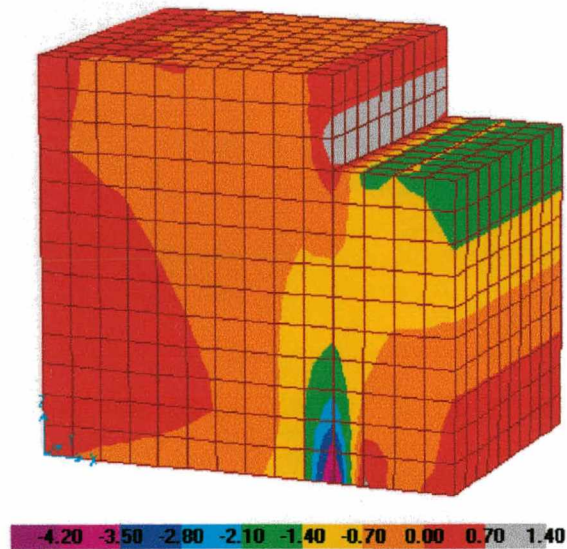


FIGURA 5.10 - Distribuição de tensões σ_z no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (kN/cm^2).

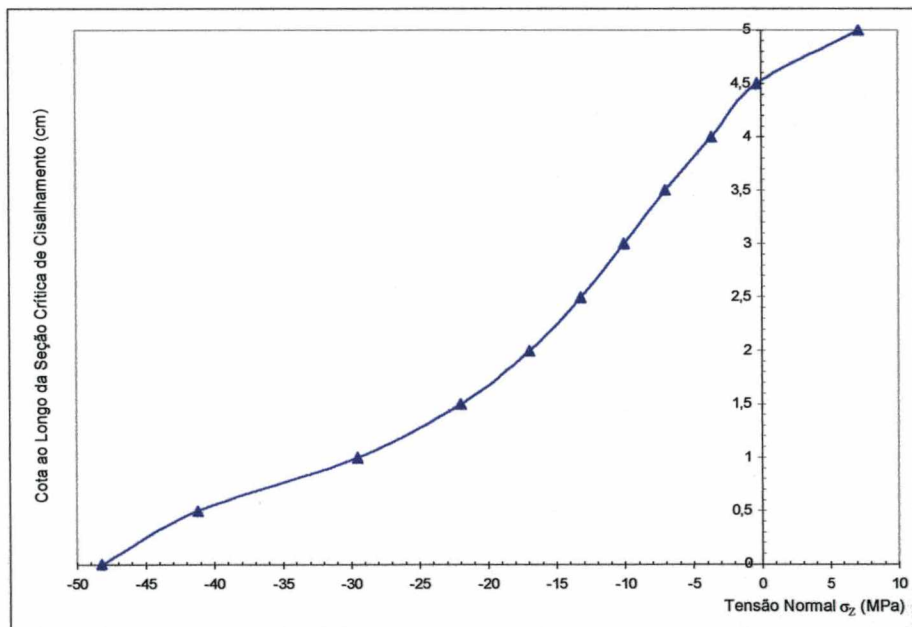


FIGURA 5.11 - Diagrama de tensões σ_z ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (MPa).

A figura 5.12 apresenta a distribuição de tensões normais na direção “x”, σ_x , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.13 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos, localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó, na linha média da seção crítica).

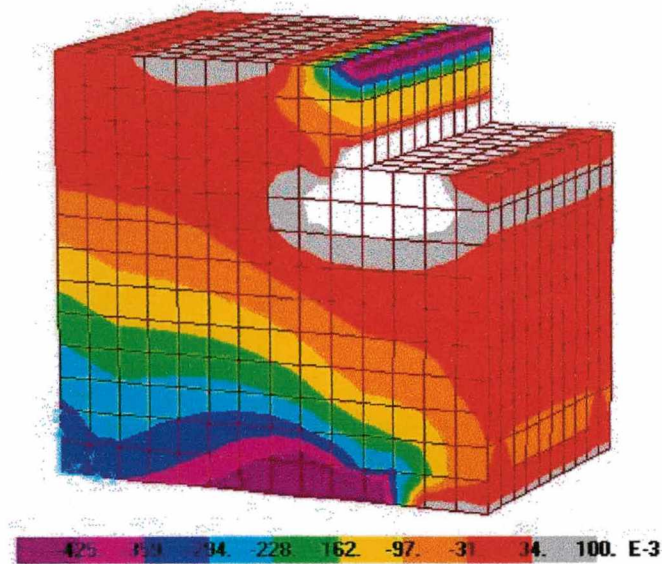


FIGURA 5.12 - Distribuição de tensões σ_x no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (kN/cm^2)

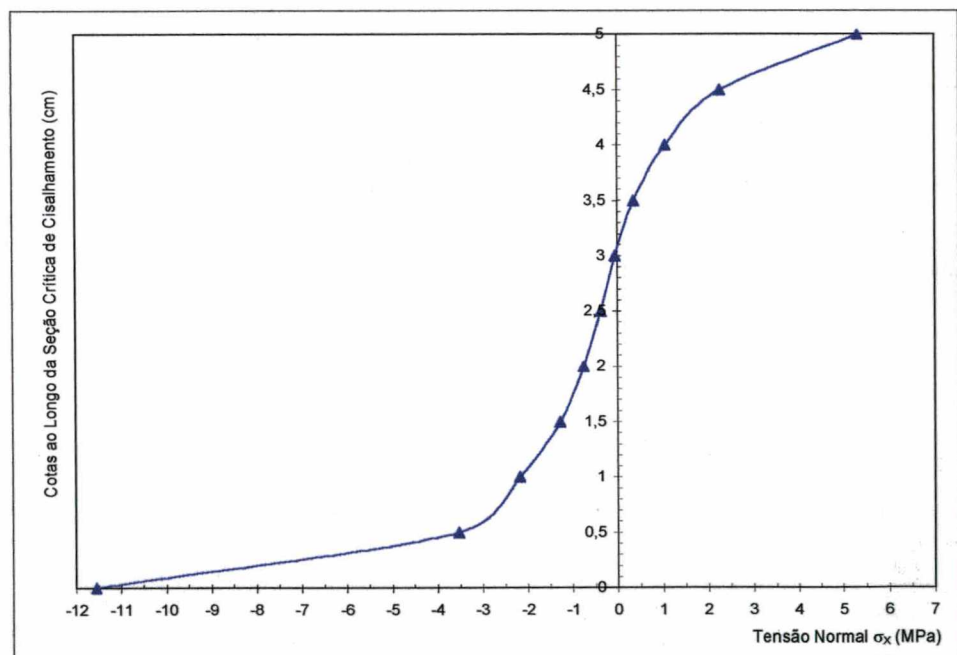


FIGURA 5.13 - Diagrama de tensões σ_x ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (MPa).

Na figura 5.14 está apresentada a distribuição de tensões normais na direção “y”, σ_y , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.15 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos,

localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó, na linha média da seção crítica).

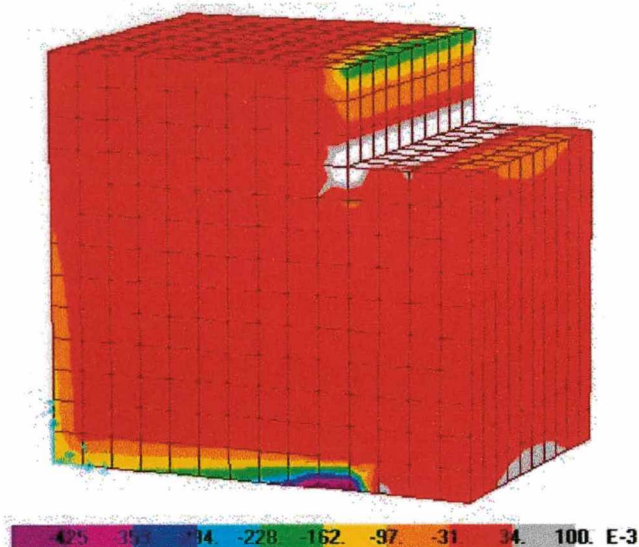


FIGURA 5.14 - Distribuição de tensões σ_y no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (kN/cm^2).

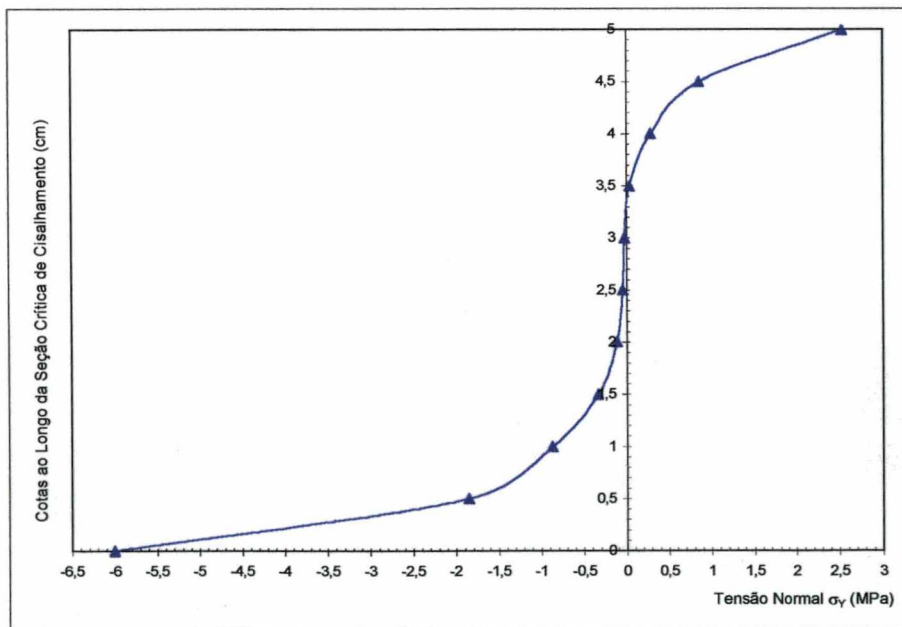


FIGURA 5.15 - Diagrama de tensões σ_y ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova da NBR 7190/97 (MPa).

Pela análise numérica do corpo-de-prova da Norma Brasileira chegou-se às seguintes conclusões:

- A distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da seção crítica não é constante. Além disso as tensões máximas de cisalhamento não ocorrem no plano de deslizamento, ou seção crítica, e sim em um plano um pouco deslocado à direita.
- As tensões normais σ_z não apresentam uma distribuição uniforme, com concentrações de tensões nas regiões do apoio e do carregamento.
- Surgem também tensões normais significativas na direção “x”, de tração na região superior e compressão na região inferior do corpo-de-prova. Assim, é de se esperar que a ruptura ocorra sob o efeito do cisalhamento combinado com tração normal.
- Embora menores, as tensões normais na direção “y” não podem ser desprezadas.

5.4.2- Corpo-de-prova estudado

5.4.2.1- Apresentação do modelo e análise numérica

O corpo-de-prova foi modelado utilizando-se elementos sólidos de 8 nós, com modos incompatíveis e três graus de liberdade em cada nó.

Denomina-se no modelo “z” o eixo vertical ao longo da altura, “y” o eixo horizontal ao longo da espessura e “x” o eixo horizontal ao longo da largura do corpo-de-prova. A origem do sistema de eixos encontra-se no vértice inferior esquerdo, na face frontal do corpo-de-prova mostrado na figura 5.16.

Inicialmente foi adotada uma malha com elementos de 0,5 cm de arestas. Não foram observadas descontinuidades significativas nas tensões entre os elementos, portanto esta malha foi considerada adequada.

As direções longitudinal, radial e tangencial foram dispostas no corpo-de-prova de maneira que o plano da seção crítica de cisalhamento ficasse paralelo à direção radial da madeira, conforme a prescrição da Norma Brasileira NBR 7190/97.

O modelo do corpo-de-prova estudado apresenta 3190 nós distribuídos em 2220 elementos. As condições de contorno foram impostas no orifício superior restringindo-se totalmente os deslocamentos dos nós na sua metade superior. A carga foi aplicada nos nós do orifício inferior, na direção “z” uniformemente distribuída em sua metade inferior, simulando desta maneira as condições experimentais de ensaio.

Foi aplicado no corpo-de-prova um carregamento de 2,4kN, para gerar uma tensão de cisalhamento de 6,0MPa, relativa ao valor médio, obtido no ensaio experimental para a madeira de *Pinus elliottii*.

Na figura 5.16 pode ser vista a geometria da malha do corpo-de-prova estudado.

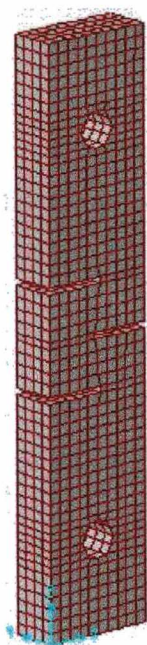


FIGURA 5.16 – Disposição da malha de elementos do corpo-de-prova estudado.

5.4.2.2- Análise dos resultados e conclusões

A figura 5.17 apresenta a distribuição de tensões de cisalhamento, τ_{xz} , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.18 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos, localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó, na linha média da seção crítica).

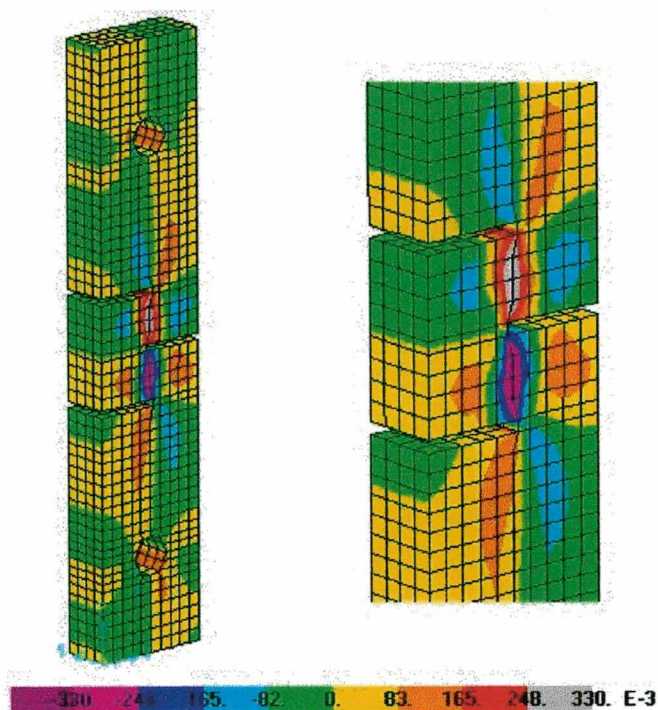


FIGURA 5.17 - Distribuição de tensões τ_{xz} no corpo-de-prova estudado (kN/cm^2).

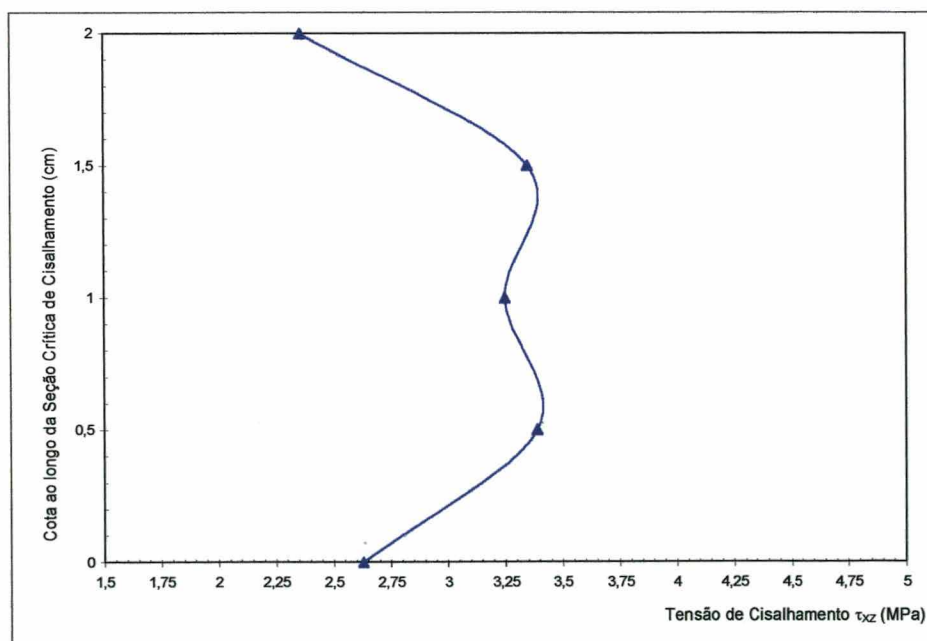


FIGURA 5.18 - Diagrama de tensões τ_{xz} ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova estudado (MPa).

Na figura 5.19 está apresentada a distribuição de tensões normais na direção “z”, σ_z , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.20 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos,

localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó, na linha média da seção crítica).

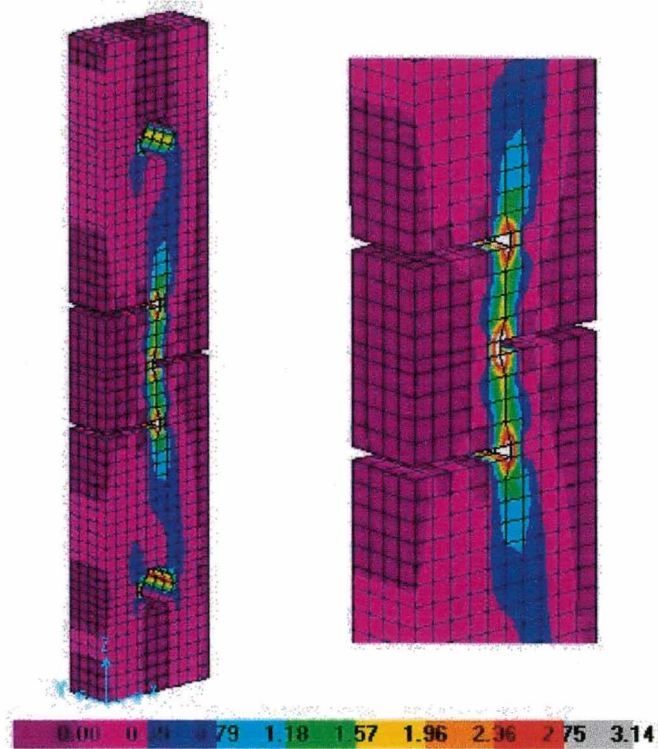


FIGURA 5.19 - Distribuição de tensões σ_z no corpo-de-prova estudado (kN/cm^2).

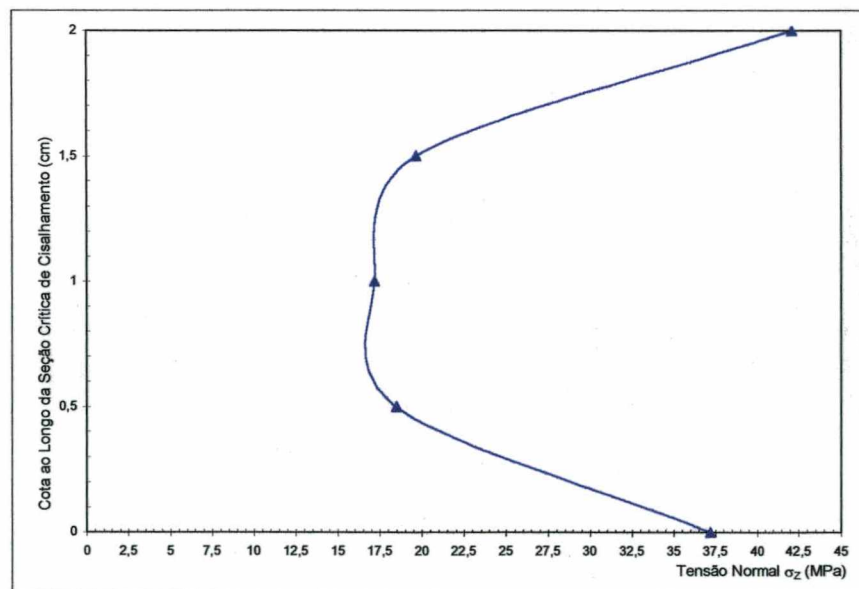


FIGURA 5.20 - Diagrama de tensões σ_z ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova estudado (MPa).

As tensões normais na direção “x”, σ_x , e na direção “y”, σ_y , apresentaram-se desprezíveis em relação aos valores das tensões de cisalhamento e normal na direção “z”, portanto, não foram apresentadas neste trabalho.

Pela análise numérica do corpo-de-prova estudado chegou-se às seguintes conclusões:

- As tensões de cisalhamento apresentaram uma distribuição mais uniforme em comparação com os resultados da análise para o corpo-de-prova da NBR 7190/97, com os valores máximos na região enfraquecida, conforme esperado.
- As tensões normais na seção crítica de cisalhamento na direção “z”, σ_z , são predominantemente de tração, apresentando valores elevados na região enfraquecida em função da presença das fendas laterais. Para atenuar estas concentrações de tensões foi desenvolvido o corpo-de-prova estudado modificado, que apresenta furos circulares na extremidade das fendas. A geometria deste corpo-de-prova já foi discutida no Capítulo 3. Logo, foi realizada também a análise numérica deste modelo de corpo-de-prova, apresentada a seguir.

5.4.3- Corpo-de-prova estudado modificado

5.4.3.1- Apresentação do modelo e análise numérica

O corpo-de-prova foi modelado utilizando-se elementos planos retangulares com 9 nós e dois graus de liberdade em cada nó.

A razão desta troca de elementos foi em função de que com os elementos sólidos de 8 nós tornou-se inviável a realização dos furos na região de cisalhamento. Assim, como o comportamento do modelo aproximava-se de um Estado Plano de Tensões (EPT) optou-se em trabalhar com elementos planos.

Denomina-se no modelo “y” o eixo vertical ao longo da altura e “x” o eixo horizontal ao longo da largura do corpo-de-prova. A origem do sistema de eixos se encontra no vértice inferior esquerdo do corpo-de-prova.

A malha é composta por elementos planos de 0,5 cm de arestas. Nas regiões dos furos para aplicação do carregamento a malha foi refinada para elementos, também de 9 nós, porém com 0,25 cm de arestas. Da mesma maneira, na região enfraquecida de cisalhamento a malha foi refinada para elementos com 0,25 cm de arestas, para confecção dos furos, no centro do corpo-de-prova. Não foram observadas descontinuidades significativas nas tensões entre os elementos, portanto estas malhas foram consideradas adequadas.

As direções longitudinal, radial e tangencial, foram dispostas no corpo-de-prova de maneira que o plano da seção crítica de cisalhamento ficasse paralelo à direção radial da madeira, conforme a prescrição da Norma Brasileira NBR 7190/97.

O modelo do corpo-de-prova estudado modificado apresenta 1207 elementos. As condições de contorno foram impostas no orifício superior restringindo-se totalmente os deslocamentos dos nós na sua metade superior. A carga foi aplicada nos nós do orifício inferior, na direção “y” uniformemente distribuída em sua metade inferior, simulando desta maneira as condições experimentais de ensaio.

Foi aplicado no corpo-de-prova um carregamento de 2,4kN, para gerar uma tensão de cisalhamento de 6,0MPa, relativa ao valor médio, obtido no ensaio experimental para a madeira de *Pinus elliottii*.

Na figura 5.21 pode ser vista a geometria da malha do corpo-de-prova estudado modificado.

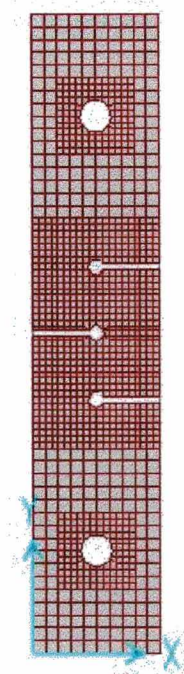


FIGURA 5.21 – Disposição da malha de elementos do corpo-de-prova estudado modificado.

5.4.3.2- Análise dos resultados e conclusões

A figura 5.22 apresenta a distribuição de tensões de cisalhamento, τ_{xy} , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.23 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos, localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó).

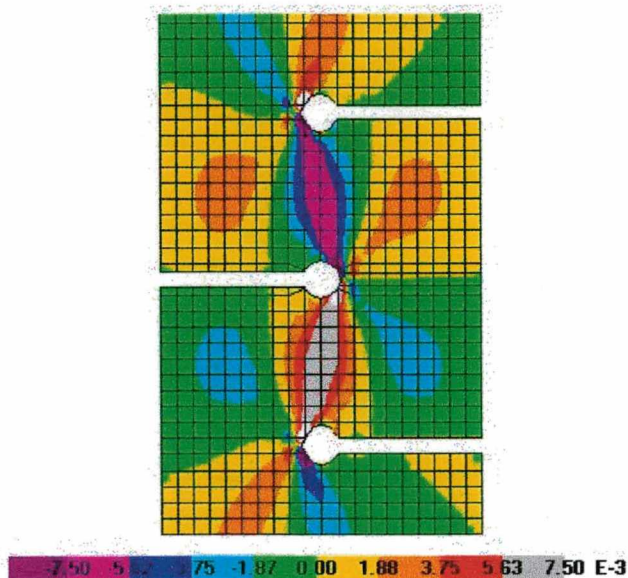


FIGURA 5.22 - Distribuição de tensões τ_{xy} no corpo-de-prova estudado modificado (kN/mm^2).

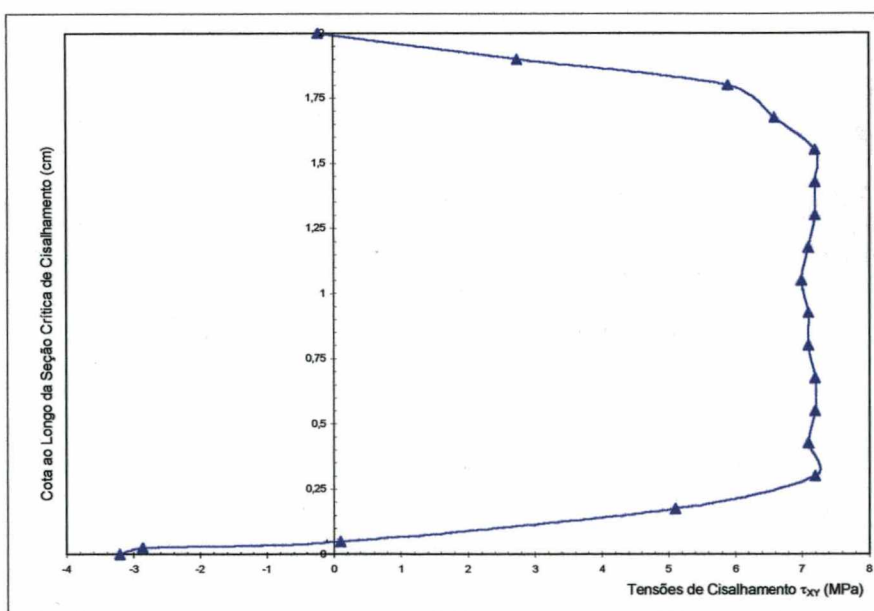


FIGURA 5.23 - Diagrama de tensões τ_{xy} ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova estudado modificado (MPa).

Na figura 5.24 está apresentada a distribuição de tensões normais na direção “y”, σ_y , obtida na análise numérica. Um diagrama desta distribuição de tensões foi plotado na figura 5.25 nos quais foram tomados os valores das tensões nos nós dos elementos, localizados ao longo da seção crítica de cisalhamento (valores médios dos elementos que concorrem em um mesmo nó).

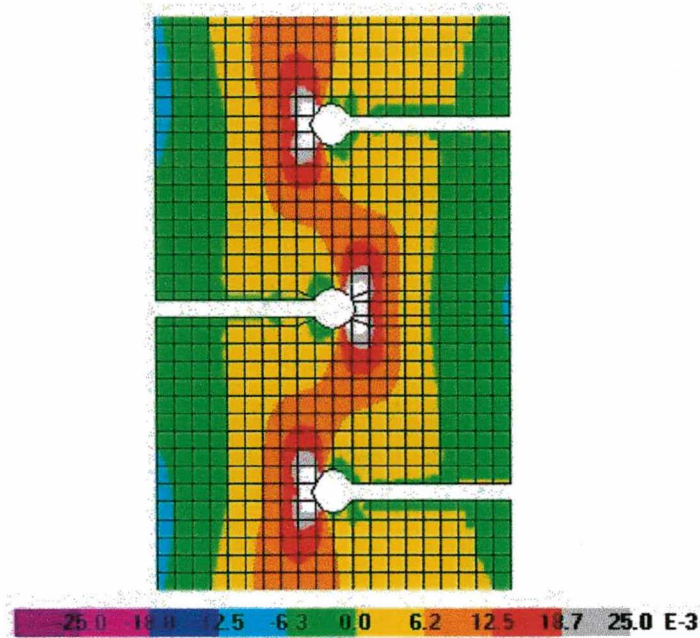


FIGURA 5.24 - Distribuição de tensões σ_y no corpo-de-prova estudado modificado (kN/mm^2).

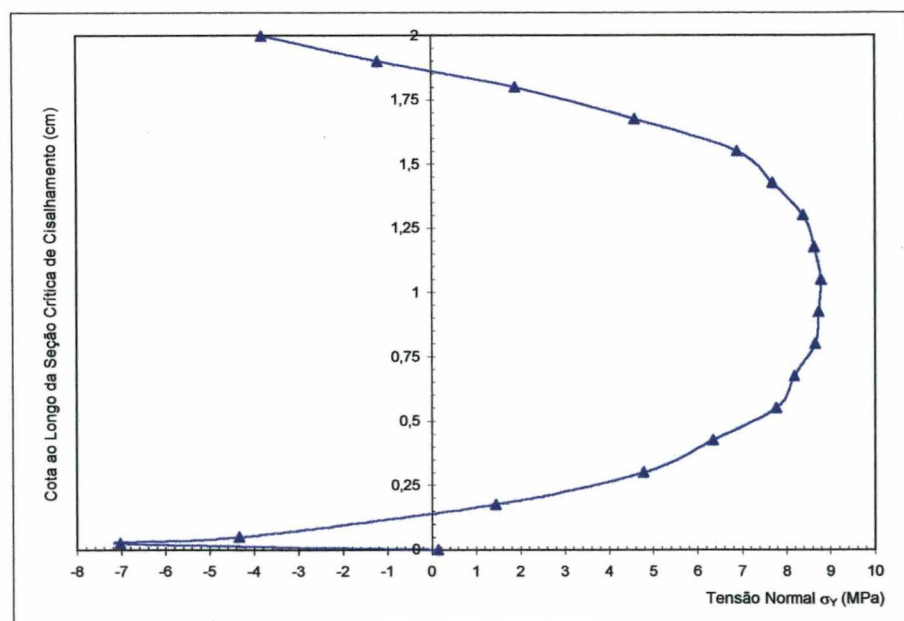


FIGURA 5.25 - Distribuição de tensões σ_y ao longo do comprimento da seção crítica no corpo-de-prova estudado modificado (MPa).

Pela análise numérica do corpo-de-prova estudado modificado chegou-se às seguintes conclusões:

- As tensões de cisalhamento apresentaram ao longo da seção crítica uma distribuição mais uniforme em comparação com os resultados da análise para corpo-de-prova estudado. Porém, deve-se ressaltar que, possivelmente, esta diferença pode ter ocorrido em função da diferença entre as malhas.

- As tensões normais presentes na seção crítica, na direção “y”, σ_y , (na análise do corpo-de-prova estudado, denominada por σ_z) apresentam valores menores que os obtidos da análise para corpo-de-prova estudado, possivelmente, em função da presença dos furos na extremidade das fendas.

6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1- Principais Conclusões Obtidas do Estudo de Cisalhamento

As principais conclusões do estudo dos corpos-de-prova de cisalhamento foram:

A resistência ao cisalhamento entre os planos longitudinal-tangencial e longitudinal-radial apresenta diferença significativa. Isto vem a afirmar a recomendação da NBR 7190/97 de confeccionar os corpos-de-prova com o plano da seção crítica paralelo à direção radial da madeira pois, nesse plano os raios medulares estão dispostos paralelos à seção crítica, onde o material oferece menor resistência ao cisalhamento o que dá a condição mais crítica para este tipo de solicitação.

As rupturas observadas nos corpos-de-prova propostos neste trabalho se deram paralelas à seção crítica de cisalhamento, ou seja, característica de ruptura por cisalhamento puro ou quase puro.

A resistência ao cisalhamento, definida pela razão entre o carregamento vertical que provoca a ruptura e a seção crítica do corpo-de-prova ($\tau=P/A$), deve ser considerada apenas como um valor de referência, em virtude desta resistência não ser perfeitamente constante ao longo de toda a seção crítica.

Neste trabalho alguns valores como módulos de elasticidade (E), módulos de elasticidade transversal (G) e Coeficientes de Poisson (ν) foram obtidos na bibliografia para se ter condições de efetuar a análise numérica. Os resultados dessa análise foram interessantes e mostraram que em termos comparativos foi possível chegar à conclusão de que os corpos-de-prova propostos oferecem uma maior confiabilidade no que se refere ao comportamento ao cisalhamento.

Apesar de haver uma diferença entre as malhas dos modelos numéricos dos corpos-de-prova estudado e estudado modificado, o que torna difícil uma conclusão mais precisa e quantitativa, este estudo mostrou que sob o ponto de vista qualitativo há uma boa distribuição das tensões de cisalhamento para estes corpos-de-prova. De qualquer forma mostra para estes corpos-de-prova um grande potencial de utilização, abrindo-se o horizonte para um estudo mais aprofundado.

6.2- Recomendações para Trabalhos Futuros

Sugere-se os seguintes trabalhos para continuidade da pesquisa:

Aplicar nos corpos-de-prova propostos e da Norma Brasileira um critério de ruptura para se analisar, mais profundamente, como se dá esta ruptura no modelo.

Comparar para a mesma malha a distribuição de tensões no corpo-de-prova estudado e estudado modificado.

Estudar numericamente, por meio de elementos finitos, novas configurações para corpos-de-prova de cisalhamento, e após realizar ensaios experimentais.

Para a análise numérica, utilizar os valores das propriedades do próprio material como: módulos de elasticidade (E), módulos de elasticidade transversal (G) e Coeficientes de Poisson (ν), que devem ser obtidos por meio de ensaios experimentais.

Realizar ensaios experimentais de cisalhamento com os corpos-de-prova com teor de umidade acima do ponto de saturação da madeira.

Verificar para teores de umidade abaixo do ponto de saturação, as diferenças nos resultados obtidos pelo Sylvatest e norma brasileira.

Confeccionar corpos-de-prova variando-se as dimensões da seção transversal na zona de cisalhamento, para valores entre $1,5 \text{ cm}^2$ e $5,0 \text{ cm}^2$, procurando-se uma área mínima de cisalhamento.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber**. ASTM D 142. Philadelphia, 1927.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber**. ASTM D 143. Philadelphia, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - **Projeto de Estruturas de Madeira**. NBR 7190. Rio de Janeiro, 1997.

_____ - **Ensaaios Físicos e Mecânicos de Madeiras**. NBR 6230. Rio de Janeiro, 1980.

_____ - **Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira**. NBR 7190. Rio de Janeiro, 1982.

_____ - **Ensaaios Físicos e Mecânicos de Madeiras**. MB-26. Rio de Janeiro, 1940.

BATHE, K., J. – **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. Prentice-Hall, Inc., Simon & Schuster, New Jersey, 1996.

BENDTSEN, B., A.; PORTER, S. – **Comparison of Results From Standard 2-Inch With 1-1/2-Inch Shear Block Tests**. Forest Products Journal. Madison, Wis., v. 28, n.7, p. 54-56, july 1978.

BODIG, J.; JAYNE, B. (1982) – **Mechanics of Wood and Wood Composites**. Van Nostrand Reinhold Company. New York, 1982.

BROTERO, F. A. – **Estudo dos Caracteres Físicos e Mecânicos das Madeiras**. Boletim do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Publicação 16. 2ª ed., 32p., 1935.

- BUCUR, V. – **Acoustics of Wood As a Tool For Nondestructive Testing**. In: 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Proceedings Lausanne, Switzerland, August 26-28, 1996. p. 53-59.
- BURGER, L., M.; RICHTER, H., G. – **Anatomia da Madeira**. Nobel. São Paulo, 1991.
- CHIMELO, J., P. – **Anatomia da Madeira**. In: Manual de Preservação de Madeiras. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, 1986. p. 41-67.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS – **Maderas. Método de Determinación del Cizalhamento Paralelo al Grano**. COPANT 463. Buenos Aires, 1972.
- COOK, R., D.; MALKUS, D., S.; PLESHA, M., E. – **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. John Wiley & Sons, Inc., third edition, 1989.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – **Bestimmung der scherfestigkeit in faserrichtung**. DIN 52 187. Berlin, 1979.
- FERREIRA, C., A., T. – **Investigação Sobre a Normalização da Resistência da Madeira**. São Paulo, 1994. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Universidade de São Paulo.
- GUITARD, D. – **Mécanique du Matériau Bois et Composites**. Toulouse, France. Editions CEPADUES. 1987.
- HEARMON, R., F., S. – **The Elasticity of Wood and Plywood**. Forest Products Research Special Report. Vol. 07, n.1. London, 1948. p. 5-44.
- HECK, L., R.; GUPTA, R.; MILLER, T., H. – **The Shear Strength of Full-Scale Structural Lumber Using Torsion Test**. In: 5th World Conference on Timber

Engineering. Proceedings Vol. 01. Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998. p. 215-222.

HELLMEISTER, J., C. – **Madeiras e Suas Características**. In: I Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Anais Vol. 01. São Carlos, São Paulo, 20 a 22 de julho, 1983. p. 1-37.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **Wood – Determination of Ultimate Shearing Stress Parallel to Grain**. ISO 3347. Switzerland, 1976.

KOLLMANN, F., P.; CÔTÉ, Jr., A., W. – **Principles of Wood Science and Technology/Solid Wood**. New York, USA. Springer-Verlag, 1984. V. 01. pp. 1-27.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – **Madeiras. Ensaio de Corte**. NP-623. Lisboa, 1973.

LAHR, F., A., R. – **Considerações a Respeito da Variabilidade de Propriedades de Resistência e de Elasticidade da Madeira**. São Carlos, 1990. Tese de Livre-Docência – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LANG, E., M. – **An Alternative Method for Shear Strength Assessment**. Forest Products Journal. Madison, Wis., v. 47, n.11/12, p. 81-84, november/december, 1997.

LA ROVERE, H., L. – **Um Elemento Híbrido de 4 Nós Eficiente para a Análise Linear e Não-Linear de Estruturas Planas**. Florianópolis, 1993. Tese para Professor Titular (Área de Análise Estrutural) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION – **Essai de Cisaillement**. B 51-012. Paris, 1942.

- LOGSDON, N., B. – **Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira.** São Carlos, 1998. Tese de Doutorado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MASCIA, N., T. – **Considerações a Respeito da Anisotropia da Madeira.** São Carlos, 1991. Tese de Doutorado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MENDES, A., P. – **Resistência da Madeira ao Cisalhamento.** São Carlos, 1984. Dissertação de Mestrado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MOREIRA, M., S., S.; FASSONI, D., P. – **Avaliação da Distribuição de Tensões e da Resistência da Madeira Protendida Transversalmente em Ensaio de Cisalhamento.** In: VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Anais Vol. 01. Florianópolis, Santa Catarina, 22 a 24 de julho, 1998. p. 147-156.
- NANNI, L., F. – **Análise Estatística de Dados com Uso de Técnicas Computacionais.** Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS, Caderno Técnico, CT-30/81. Porto Alegre, 1986.
- NORRIS, C., B. – **Comparison of Standard Block-Shear Test with the Panel-Shear Test.** Forest Products Journal. Madison, Wis., v. 07, n.09, p. 299-301, September 1957.
- PLUVINAGE, G. – **La Rupture du Bois et de Ses Composites.** Toulouse, France. Editions CEPADUES. 1992.
- RADCLIFFE, B. M.; SUDDARTH, S., K. – **The Notched Beam Shear Test for Wood.** Forest Products Journal. Madison, Wis., v. 05, n.02, p. 131-135, april, 1955.
- RIYANTO, D., S.; GUPTA, R. – **A Comparison of Test Methods for Evaluating Shear Strength of Structural Lumber.** Forest Products Journal. Madison, Wis., v. 48, n.02, p. 83-90, february, 1998.

ROSS, R., J.; BRASHAW, B., K.; PELLERIN, R., F. – **Nondestructive Evaluation of Wood**. Forest Products Journal, v. 48, n. 01, p. 14-19, 1998.

SANDOZ, J., L. – **Grading of Construction Timber by Ultrasound**. Wood Science and Technology, v. 23, n. 01, p. 95-108, 1989.

_____ – **Ultrasonic Solid Wood Evaluation in Industrial Applications**. In: 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Proceedings Lausanne, Switzerland, August 26-28, 1996. p. 147-153.

SANDOZ, J., L.; LORIN, P. – **Tares Internes de Bois Sur Pied: Détection par Ultrasons**. Rev. For. Fr. XLVIII – 3, 1996. p. 231-239.

SAP 2000 PLUS – **Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures**. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, U.S.A., 1996.

SZÜCS, C., A. – **Étude d'un Assemblage par Pièce de Coin en Bois Lamellé-collé Renforcé par Fibres de Verre**. Metz, 1991. Tese de Doutorado – L'Université de Metz.

_____ - **A Madeira no Mundo dos Compósitos**. Florianópolis, 1993. Concurso para Professor Titular – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

_____ - **Comportamento Mecânico do Compósito Madeira Segundo o Critério da Conservação de Energia**. In: V Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira. Anais Vol. 02. Belo Horizonte, Minas Gerais, 19 a 21 de julho, 1995. p.75-83.

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY – **Mode d'emploi Syvatest**. Lausanne, Switzerland, 1991.

TANAAMI, R. G. – **Influência da Umidade e da Densidade em Propriedades de Resistência Elasticidade da Madeira**. São Carlos, 1986. Dissertação de Mestrado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VIEIRA, A. – **Ensaio de Cisalhamento de Madeiras**. Boletim do Instituto de Engenharia, 32 (155), 1940. 6p. Publicação IPT, 111.

WHITE, M., S. – **Wood Identification Handbook**. Virginia, Eastern United States Colonial Hardwoods, 1980. 88p.

WILCOX, W., W.; BOTSAL, E., E.; KUBLER, H. – **Wood as a Building Material: a Guide for Designers and Builders**. Wiley-Interscience Publications, 1991.

WOOD HANDBOOK – **Wood as an Engineering Material**. Agriculture Handbook 72. USDA, Washington, D.C., 1987.

ANEXO A - Teores de umidade obtidos pelo Sylvatest e NBR 7190/97

TABELA A.1 – Umidade dos corpos de prova de *Eucalyptus grandis*, obtido através da NBR 7190/97.

C.P./Barra	Umidade (%)	Corpo de prova	Umidade (%)
1/1	82,01	7/3	76,70
2/1	89,44	8/3	88,17
3/1	99,49	9/3	77,40
4/2	92,78	10/4	79,57
5/2	76,52	11/4	74,47
6/2	74,68	12/4	71,01

TABELA A.2 – Umidade dos corpos de prova de *Pinus elliottii*, obtido através da NBR 7190/97.

C.P./Barra	Umidade (%)	Corpo de prova	Umidade (%)
1/1	86,1	7/3	74,8
2/1	108,6	8/3	86,1
3/1	91,7	9/3	74,8
4/2	90,3	10/4	91,7
5/2	81,8	11/4	91,7
6/2	90,3	12/4	95,9

TABELA A.3 – Umidade dos corpos de prova de *Eucalyptus grandis*, obtido através do Sylvatest.

Leitura/Barra	Umidade (%)	Leitura/Barra	Umidade (%)
1/1	91,7	7/3	80,4
2/1	97,3	8/3	88,9
3/1	115,7	9/3	88,9
4/2	80,4	10/4	74,8
5/2	74,8	11/4	79,0
6/2	81,8	12/4	76,2

TABELA A.4 – Umidade dos corpos de prova de *Pinus elliottii*, obtido através do Sylvatest.

Leitura/Barra	Umidade (%)	Leitura/Barra	Umidade (%)
1/1	91,49	7/3	87,93
2/1	114,04	8/3	81,52
3/1	82,01	9/3	80,96
4/2	96,22	10/4	92,06
5/2	94,02	11/4	110,44
6/2	107,10	12/4	110,56

ANEXO B - Resistências ao cisalhamento e densidade aparente dos corpos de prova ensaiados

TABELA B.1 – Resultados obtidos para o *Eucalyptus grandis* nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado no plano LT.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1E/LT	7,67	709,93	14,79	8,31	698,38
2E/LT	8,31	774,34	14,26	8,87	769,31
3E/LT	8,49	760,22	13,67	8,91	754,25
4E/LT	9,23	713,13	13,49	9,64	708,67
5E/LT	7,48	793,64	13,84	7,89	788,00
6E/LT	8,01	843,82	13,91	8,47	837,81
7E/LT	6,65	626,14	15,34	7,32	614,84
8E/LT	7,34	632,77	15,53	8,12	620,57
9E/LT	8,59	712,61	15,29	9,44	701,41
10E/LT	6,85	661,53	15,53	7,57	649,90
11E/LT	7,29	726,87	15,36	8,02	714,91
12E/LT	6,43	638,03	14,75	6,96	627,51

TABELA B.2 – Resultados obtidos para o *Eucalyptus grandis* nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado no plano LR.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1E/LR	6,09	746,98	13,41	6,35	743,34
2E/LR	6,48	692,15	14,61	6,98	683,81
3E/LR	6,77	743,38	13,90	7,16	737,62
4E/LR	6,52	703,93	14,47	7,00	696,19
5E/LR	8,11	846,69	13,68	8,52	842,41
6E/LR	7,34	729,31	15,07	8,02	721,43
7E/LR	7,10	715,15	14,59	7,65	706,74
8E/LR	6,13	728,48	13,20	6,35	724,18
9E/LR	6,88	708,30	14,60	7,41	699,44
10E/LR	5,62	630,20	11,98	5,61	630,26
11E/LR	6,51	638,38	14,84	7,06	629,11
12E/LR	6,13	627,74	14,19	6,53	620,44

TABELA B.3 – Resultados obtidos para o *Pinus elliottii*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado no plano LT.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1E/LT	6,65	580,41	14,37	7,12	570,72
2E/LT	5,58	561,69	12,43	5,65	560,12
3E/LT	6,35	569,05	13,07	6,55	565,02
4E/LT	7,28	578,53	12,25	7,34	577,47
5E/LT	6,30	557,72	11,72	6,25	558,82
6E/LT	7,49	490,17	13,74	7,88	483,05
7E/LT	6,07	579,57	13,83	6,40	572,34
8E/LT	5,46	554,98	14,07	5,80	547,26
9E/LT	7,83	580,69	14,23	8,35	571,58
10E/LT	6,10	557,62	13,25	6,33	552,29
11E/LT	7,46	559,32	12,44	7,56	557,58
12E/LT	6,28	488,78	13,13	6,50	484,01

TABELA B.4 – Resultados obtidos para o *Pinus elliottii* nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado no plano LR.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1E/LR	5,01	557,57	13,80	5,28	550,91
2E/LR	5,79	546,70	13,90	6,12	539,28
3E/LR	6,19	538,33	13,53	6,48	532,95
4E/LR	4,30	577,29	14,04	4,56	569,70
5E/LR	5,49	480,38	13,48	5,74	475,15
6E/LR	4,69	552,75	13,76	4,94	545,72
7E/LR	5,21	538,96	13,63	5,46	533,32
8E/LR	4,58	557,65	13,85	4,84	551,85
9E/LR	6,66	576,44	14,13	7,09	568,24
10E/LR	5,70	560,89	13,94	6,03	553,35
11E/LR	5,17	554,90	13,59	5,42	548,25
12E/LR	6,57	574,33	13,84	6,93	570,08

TABELA B.5 – Resultados obtidos para o *Eucalyptus grandis*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado modificado no plano LT.

C.P.	$F_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1EM/LT	8,36	697,11	13,79	8,81	691,05
2EM/LT	8,75	770,90	13,54	9,15	767,52
3EM/LT	7,58	756,91	12,29	7,65	756,21
4EM/LT	7,26	776,85	13,43	7,57	773,52
5EM/LT	8,73	736,49	14,33	9,34	729,30
6EM/LT	7,02	667,19	14,05	7,45	661,06
7EM/LT	7,28	614,77	12,36	7,36	613,76
8EM/LT	7,63	609,97	14,27	8,14	601,57
9EM/LT	6,05	694,94	13,55	6,33	690,41
10EM/LT	8,40	726,07	13,14	8,69	722,75
11EM/LT	7,52	706,79	13,14	7,77	703,49
12EM/LT	8,63	706,59	14,44	9,26	700,63

TABELA B.6 – Resultados obtidos para o *Eucalyptus grandis*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado modificado no plano LR.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1EM/LR	6,70	751,66	13,06	6,91	748,22
2EM/LR	7,24	729,48	13,23	7,51	725,20
3EM/LR	8,06	883,56	14,08	8,64	875,01
4EM/LR	7,93	745,70	11,92	7,91	745,96
5EM/LR	6,33	651,67	12,16	6,36	651,21
6EM/LR	5,80	615,56	14,08	6,16	609,05
7EM/LR	7,44	652,90	13,79	7,84	647,70
8EM/LR	7,87	754,50	13,08	8,12	751,52
9EM/LR	5,95	647,07	13,24	6,18	642,74
10EM/LR	6,24	606,81	14,07	6,63	600,77
11EM/LR	5,54	597,88	12,34	5,60	596,94
12EM/LR	6,77	604,44	13,38	7,06	600,27

TABELA B.7 – Resultados obtidos para o *Pinus elliottii*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado modificado no plano LT.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1EM/LT	7,37	576,67	13,35	7,67	571,27
2EM/LT	6,43	566,30	11,64	6,36	567,85
3EM/LT	5,34	537,45	12,10	5,36	537,01
4EM/LT	7,14	595,82	11,78	7,09	596,89
5EM/LT	5,30	531,03	13,82	5,59	526,02
6EM/LT	6,71	595,10	12,56	6,82	592,80
7EM/LT	6,09	490,02	12,02	6,09	489,93
8EM/LT	5,87	538,95	12,68	5,99	536,25
9EM/LT	6,22	566,21	11,65	6,16	567,31
10EM/LT	6,97	626,30	13,36	7,25	619,73
11EM/LT	7,03	595,64	11,78	6,98	596,59
12EM/LT	5,88	537,03	12,72	6,01	534,33

TABELA B.8 – Resultados obtidos para o *Pinus elliottii*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova estudado modificado no plano LR.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1PM/LR	5,73	595,40	12,99	5,90	591,36
2PM/LR	4,54	567,45	13,41	4,74	561,79
3PM/LR	6,69	589,89	13,52	7,00	582,96
4PM/LR	4,20	457,24	12,94	4,32	454,44
5PM/LR	5,38	546,81	13,03	5,55	542,37
6PM/LR	4,85	548,90	13,45	5,06	543,34
7PM/LR	6,04	584,22	13,19	6,26	579,64
8PM/LR	4,73	429,02	12,62	4,82	426,77
9PM/LR	6,02	600,03	12,90	6,18	596,49
10PM/LR	5,37	589,91	12,98	5,53	585,77
11PM/LR	5,07	549,34	12,93	5,21	545,65
12PM/LR	5,98	583,70	13,04	6,17	579,96

TABELA B.9 – Resultados obtidos para o *Eucalyptus grandis*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova da NBR 7190/97 no plano LT.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1N/LT	6,88	650,12	14,14	7,32	643,59
2N/LT	6,09	653,90	13,91	6,43	647,48
3N/LT	8,27	763,45	14,08	8,79	757,45
4N/LT	6,71	724,26	13,48	7,01	719,07
5N/LT	7,47	706,50	13,97	7,91	700,25
6N/LT	5,95	633,95	14,11	6,32	629,24
7N/LT	6,81	708,04	14,07	7,24	701,23
8N/LT	5,89	699,96	14,10	6,26	694,07
9N/LT	6,37	638,99	14,37	6,83	634,29
10N/LT	8,65	635,87	13,94	9,15	631,44
11N/LT	6,52	650,47	14,02	6,91	643,33
12N/LT	5,01	632,46	13,90	5,29	626,55

TABELA B.10 – Resultados obtidos para o *Eucalyptus grandis*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova da NBR 7190/97 no plano LR.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1N/LR	7,27	813,8	12,92	7,47	811,72
2N/LR	4,14	639,80	13,41	4,32	635,28
3N/LR	6,11	654,22	13,16	6,33	650,39
4N/LR	5,93	625,55	13,39	6,18	620,65
5N/LR	5,43	660,19	13,32	5,64	656,59
6N/LR	6,70	680,15	13,25	6,95	674,68
7N/LR	6,21	711,38	13,49	6,49	705,93
8N/LR	5,56	690,31	13,17	5,75	685,92
9N/LR	6,27	737,17	12,88	6,43	734,52
10N/LR	6,97	731,14	13,53	7,29	726,70
11N/LR	5,02	655,98	12,92	5,16	653,02
12N/LR	6,67	646,63	13,72	7,01	640,18

TABELA B.11 – Resultados obtidos para o *Pinus elliottii*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova da NBR 7190/97 no plano LT.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1N/LT	5,93	557,49	14,14	6,31	550,21
2N/LT	4,60	428,13	13,91	4,87	421,66
3N/LT	4,89	463,24	14,08	5,20	455,42
4N/LT	6,87	546,80	13,48	7,18	540,64
5N/LT	3,94	459,39	13,97	4,17	452,70
6N/LT	4,61	472,06	14,11	4,90	464,41
7N/LT	4,03	456,72	14,07	4,28	449,01
8N/LT	6,22	427,08	14,10	6,61	420,26
9N/LT	6,89	560,29	14,37	7,38	552,24
10N/LT	4,91	450,79	13,94	5,19	450,03
11N/LT	4,22	462,74	14,02	4,47	457,77
12N/LT	4,86	418,33	13,90	5,14	412,90

TABELA B.12 – Resultados obtidos para o *Pinus elliottii*, nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, para o corpo de prova da NBR 7190/97 no plano LR.

C.P.	$f_{v0,máx.}$ (MPa)	ρ_{ap} (Kg/m ³)	U (%)	$f_{v0,máx.,12\%}$ (MPa)	$\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m ³)
1N/LR	4,14	436,15	13,85	4,37	429,48
2N/LR	5,48	557,20	13,69	5,76	551,05
3N/LR	4,85	454,21	13,59	5,08	447,76
4N/LR	4,79	450,95	13,41	5,00	446,21
5N/LR	6,63	569,68	12,21	6,67	568,80
6N/LR	3,59	427,57	13,77	3,78	421,98
7N/LR	5,03	422,61	13,75	5,30	416,79
8N/LR	5,76	578,99	13,21	5,97	574,36
9N/LR	4,54	560,73	13,67	4,76	554,62
10N/LR	4,07	452,52	13,53	4,26	446,70
11N/LR	4,89	429,25	13,65	5,14	424,17
12N/LR	5,87	579,03	13,22	6,08	573,98